Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук»

На правах рукописи

Саломатин Александр Александрович

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГРУППЫ БПЛА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГРУЗОВ С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.3.8 Информатика и информационные процессы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., проф.
Мещеряков Р.В.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. Анализ необходимости разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 16

1.1. Применение групп БПЛА для транспортировки грузов 16

1.2. Информационно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 22

1.3. Функционирование АМИС в неблагоприятных условиях 43

1.4. Методы прогностической обработки метеорологической статистической информации 54

Выводы по Главе 1 59

Глава 2. Разработка информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 60

2.1. Организация данных информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 64

2.2. Методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 66

2.3. Метод обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС 77

2.4. Масштабируемость информационного обеспечения 87

Выводы по Главе 2 95

Глава 3. Разработка алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации 97

3.1. Алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями 101

3.2. Алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам 116

3.3. Масштабируемость алгоритмического обеспечения 125

Выводы по Главе 3 130

Глава 4. Оценка результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов 132

4.1. Оценка результатов разработанного метода обработки метеорологической информации посредством проведения вычислительных экспериментов 132

4.2. Оценка результатов разработанного алгоритмического обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов 141

4.3. Оценка результатов разработанного информационного обеспечения посредством проведения вычислительного эксперимента 153

Выводы по Главе 4 164

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 166

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 169

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 170

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справочные материалы (таблицы) 185

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Вспомогательные материалы к Главе 2 и Главе 3 191

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Данные проводимых экспериментов для разработанного метода 205

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельства о государственной регистрации ЭВМ ... 229

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Данные проводимых экспериментов для разработанного алгоритмического обеспечения 231

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения 255

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Данные проводимых экспериментов для разработанного информационного обеспечения 257

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования процессов организации и управления транспортно-экспедиционной деятельностью, необходимостью обеспечения качества транспортно-логистических услуг для грузоотправителей, повсеместной цифровизацией транспортной отрасли в соответствии с положениями программы цифровой экономики Российской Федерации до 2035 г. [1].

Возникают новые требования к разработке интеллектуальных транспортных систем, опирающихся на современные информационно-телекоммуникационные технологии и глобальную навигационную систему. Эти системы должны обеспечивать интеграцию информации между транспортными системами и способствовать внедрению высокоэффективных товаротранспортных и логистических технологий [2].

Проводятся исследования в области оптимизации управления транспортно-логистической деятельностью и автоматизации на основе интеллектуальных систем по следующим направлениям:

– применение информационных технологий при моделировании и управлении транспортно-логистическими и экспедиционными услугами [3-6];

– применение интеллектуальных информационных технологий в процессах оптимизации вопросов транспортной логистики [7-9];

– организация и управление транспортно-экспедиционной деятельностью [7-11];

– оптимизация организации и управления транспортной деятельностью и оказании транспортного сервиса с использованием интеллектуальных информационных технологий [10-14];

– информационные и интеллектуальные технологии в логистике, цифровой логистике, применение и организация интеллектуальных транспортных систем [7-10];

– логистика и экономика транспортной деятельности, включая вопросы взаимодействия [7, 8].

Для транспортировки грузов перспективным становится применение беспилотных авиационных систем (БАС), входящих в состав интеллектуальных транспортных систем (ИТС). ИТС формируются на пересечении интеллектуальных информационных технологий и транспортной отрасли. Они охватывают такие аспекты, как: моделирование транспортных потоков, информационные системы (ИС) и системы управления движением транспортных средств.

При решении сложных транспортных задач, связанных с высокими требованиями к качеству их выполнения, рационально использовать БАС, содержащие не один беспилотный летательный аппарат (БПЛА), а целую гетерогенную группу таких аппаратов. Гетерогенность группы БПЛА определяется наличием БПЛА с разными функциональными характеристиками, аппаратными и программными решениями для выполнения различных задач в составе группы. Такая группа БПЛА, в отличие от гомогенной группы, позволяет в случае рационального распределения задач между ними справиться с выполнением транспортировки грузов более успешно. Присутствует большой опыт применения групп БПЛА для транспортировки грузов [15-41].

Активно разрабатываются и развиваются автоматизированные ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, в работу которых основной вклад вносит их информационное и алгоритмическое обеспечение.

В соответствии с ГОСТ Р 59853-2021 [42] информационное обеспечение автоматизированной системы означает «упорядоченную по структуре и формам представления и предназначенную для использования в автоматизированной системе информацию, а также совокупность методов и

средств ее формирования, хранения, актуализации и предоставления для использования в автоматизированной системе».

Методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в информационном обеспечении автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов неразрывно связаны с её алгоритмическим обеспечением, представляющим собой набор взаимосвязанных алгоритмов, обеспечивающих решение задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов.

Разработке эффективного обеспечения автоматизированных ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации и его компонент посвящены исследования, как проводимые в России, так и за рубежом [43-62].

В целях обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов пользователям воздушного пространства и органам, осуществляющим организацию воздушного движения, должна поступать метеорологическая информация, содержащая необходимые сведения о метеорологических условиях в конкретном районе (или на конкретной территории) на определенный момент или период времени [63]. Для своевременного сбора и обработки информации о метеорологических условиях применяются автоматизированные метеорологические измерительные системы (АМИС). Согласно [64] АМИС представляет собой «комплекс для определения, обработки, отображения и распространения данных о метеорологических параметрах в режиме реального времени, в состав которого входят автоматические метеорологические датчики и измерительные приборы, способные функционировать непрерывно и без помощи обслуживающего персонала в течение продолжительных периодов времени». Примеры АМИС приведены в исследованиях [65-69].

При неблагоприятных условиях происходит нарушение функционирования АМИС, в связи с чем возникает необходимость восстановления непрерывного измерения всех метеорологических параметров. Является возможным применение методов прогностической обработки метеорологической информации, которые поддерживают непрерывное функционирование АМИС и формируют в оперативном режиме прогнозные значения, необходимые для замены отсутствующих метеорологических параметров и учитываемые при планировании полета. Среди отсутствующих параметров могут быть наличие дождя, снега, высота верхней границы облачности и температура.

Исследования Астапенко П.Д., Баранова А.М., Шварева И.М., Антохина Е.А., Панасенко Н.Г., Атакищева О.И., Черновой П.Д., Горбунова А.А., Галимова А.Ф., Кузнецова И.Е., Мельникова А.В., Рогозина Е.А., Страшко О.В., Носова А.М., Савельева А.И., Вильянинова В.Н., Ромашовой Ю.Е., Лебедева И.В., Лебедевой В.В., Янина А.П., Самохвалова И.М., Raivi A., Asiful H., Alam M., Moh S. подтверждают важность учета данных параметров при планировании полета [70-76].

Исследования [77-84] посвящены существующим методам прогностической обработки статистической метеорологической информации.

Текущее исследование направлено на разработку алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом неблагоприятных условий функционирования автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы (АМИП) и метода обработки метеорологической информации в АМИС.

Объект диссертационного исследования: автоматизированная ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Предмет диссертационного исследования: информационные процессы в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о

распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Для достижения поставленной **цели** потребовалось решить следующие задачи:

1) провести анализ предметной области в части необходимости разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации;
2) разработать информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации;
3) разработать метод обработки метеорологической информации для АМИС, включающий оперативную прогностическую обработку информации при неблагоприятных условиях функционирования АМИС;
4) разработать алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации;
5) провести оценку результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов.

Методы исследований: в работе применяются элементы теории множеств, нечеткой логики, теории графов, эвристические и метаэвристические методы, методы экстраполяции.

Научная новизна полученных результатов состоит в разработке:

– информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке

грузов с учетом метеорологической информации, отличающегося от существующих методами и средствами прогностической обработки метеорологической информации, поддерживающими принятие решение на стратегическом уровне управления при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, и предоставляющего эффективную в части достоверности информацию о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА (п. 6, 16 паспорта специальности 2.3.8);

– метода обработки метеорологической информации в АМИС, отличающегося от существующих оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС и формирующего необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры (п. 7, 16 паспорта специальности 2.3.8);

– алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, отличающегося от существующих алгоритмом построения маршрутной сети и алгоритмом распределения транспортных средств по маршрутам, работающими при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, которое поддерживает принятие решение на стратегическом уровне управления в части формирования рационального сценария транспортировки грузов и соответствующего ему показателя стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА (п. 6, 16 паспорта специальности 2.3.8).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа выполнена в рамках специальности 2.3.8. Информатика и информационные процессы (п.6. Обеспечение информационных систем и процессов, применения информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления. Общие принципы и основы организации информационных служб и

электронных библиотек; п.7. Разработка методов обработки, группировки и аннотирования информации, в том числе, извлеченной из сети интернет, для систем поддержки принятия решений, интеллектуального поиска, анализа; п.16. Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.)

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, а также метода обработки информации в АМИС.

Практическая значимость результатов заключается в полезности разработанного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации для всех, кто занимается транспортировкой грузов, в следующих видах деятельности: интернет-торговля, почтовое обслуживание, доставка медикаментов и медицинского оборудования, розничная торговля и общественное питание, гуманитарные операции и работа в условиях чрезвычайных ситуаций, доставка грузов в рамках промышленной кооперации, доставка военных грузов при материально-техническом обеспечении воинских формирований.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы» (шифр отсутствует, № ГР 121112200279-8, заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского) и «Разработка модели интеллектуального

группового взаимодействия воздушных судов и других элементов беспилотной авиационной транспортной системы с реализацией программных модулей оптимизации загруженности транспортных потоков» (шифр «ВИАС-МОДЕЛЬ-2022», заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования использованы при реализации научных исследовательских проектов: «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы на основе проведения летного эксперимента» (шифр отсутствует, № ГР 121112200279-8, заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского), «Разработка модели интеллектуального группового взаимодействия воздушных судов и других элементов беспилотной авиационной транспортной системы с реализацией программных модулей оптимизации загруженности транспортных потоков» (шифр «ВИАС-МОДЕЛЬ-2022», заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского).

Основные результаты и положения. Положения, выдвигаемые для защиты, состоят в том, что разработан(-о):

– информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, которое улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА;

– метод обработки метеорологической информации в АМИС, включающий оперативную прогностическую обработку информации в

неблагоприятных условиях функционирования АМИС, который формирует необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры;

– алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации с алгоритмом построения маршрутной сети и алгоритмом распределения транспортных средств по маршрутам, работающими при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, которое улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА для рассчитанного рационального сценария транспортировки грузов до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения.

Достоверность полученных научных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью теоретических выводов с результатами имитационного моделирования транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА, а также результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, совещаниях и семинарах: I Международная конференция по цифровизации сельского хозяйства и органическому производству (ADOP 2021, Санкт-Петербург, заочно), 17-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС’2021, Москва, очно), 17-я Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» и 13-я Молодежная школа-семинар «Управление и обработка информации в технических системах» (Таганрог, 2022, очно), 18-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС’2022, Челябинск, очно), 19-я Всероссийская школа- конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2023, Воронеж,

очно), 14-е Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024, Москва, очно).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 научных статей, в том числе 3 публикации в изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, 3 статьи из перечня научных изданий, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и/или Scopus, а также 7 рецензируемых изданий.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Основная часть работы изложена на 184 страницах, содержит 31 иллюстрацию, 19 таблиц. Список цитируемой литературы включает 131 наименование.

Глава 1 работы посвящается обоснованности необходимости разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Проводится обзор применения групп БПЛА для транспортировки грузов. Исследуется существующее информационно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Проводится обзор и анализ работ, создающих предпосылки для функционирования АМИС в неблагоприятных условиях. Исследуются методы прогностической обработки метеорологической информации.

Глава 2 посвящается разработке информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Предлагается упорядоченная по структуре и формам представления информация, а также методы и средства её формирования, хранения, актуализации и предоставления для использования в системе. Предлагается метод обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных

условиях функционирования АМИС. Описывается масштабируемость разработанного информационного обеспечения.

Глава 3 посвящается разработке алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Предлагается набор взаимосвязанных алгоритмов планирования и оптимизации транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА. Описывается масштабируемость разработанного алгоритмического обеспечения.

Глава 4 посвящается оценке результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством вычислительных экспериментов. Излагается планирование и проведение экспериментов, проводится обработка и анализ полученных результатов экспериментов для разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения.

Глава 1. Анализ необходимости разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

1.1. Применение групп БПЛА для транспортировки грузов

Территория Российской Федерации содержит большое число труднодоступных районов, расположенных на значительном удалении от магистральных транспортных сетей и лишенных доступа к основным социальным и транспортным услугам. Примерно 28 тысяч населенных пунктов не имеют круглогодичного доступа к ключевым наземным транспортным коммуникациям [15].

Для обеспечения потребностей народного хозяйства в грузоперевозках эффективным направлением представляется внедрение новых технологических решений по созданию авиационных транспортных систем на основе применения транспортных БПЛА. По мере совершенствования систем связи, навигации, управления, появления новых материалов и технологий возникли предпосылки для использования БПЛА для решения более широкого круга задач [16]. В гражданской сфере это решение задач геодезии, картографии, геологоразведки, медицинской помощи, авиационных сельскохозяйственных работ и транспортных перевозок [17-23]. Промышленное применение БПЛА в качестве авиационных транспортных средств находится на ранней стадии развития [24, 25]. БПЛА различной размерности могут обеспечить доставку широкого спектра грузов – от дальних перевозок габаритных объектов до непосредственной доставки грузов группам получателей, оторванных от магистральных доставок [26, 27].

Применение БПЛА для доставки грузов позволяет обходить пространственные ограничения местности, снижает потребность в рабочей силе, является более экономичным и гибким решением, что помогает преодолевать недостатки традиционной логистики. В горных и сельских районах, где наблюдается нехватка человеческих ресурсов, БПЛА способны

быстро осуществлять доставки грузов. В связи с этим, технология доставки с использованием БПЛА вызвала интерес у множества исследователей.

Существуют различные типы БПЛА, которые могут входить в состав гетерогенной группы БПЛА: одновинтовые и мультироторные вертолеты, самолеты с фиксированным крылом и гибридные комбинации [28]. Каждый тип БПЛА обладает своими преимуществами и недостатками при выполнении задачи транспортировки грузов с учетом ограничений задачи (см. Табл. А.1). Наибольший интерес для текущей работы представляют мультироторные вертолёты, способные доставлять груз на небольших ограниченных территориях и в больших по площади помещениях без спецавиационных правил (сборочные цеха, территории заводов, фабрик, больниц, санаториев и др.).

Создание транспортных БАС имеет несколько предпосылок: имеется значительный опыт и научные разработки, касающиеся проектирования и производства БПЛА, улучшились характеристики БПЛА в отношении грузоподъемности, дальности полета, надежности, автономности и др., накоплен опыт использования БПЛА в других сферах, что свидетельствует об их эффективности, возросла потребность в качественных сервисах доставки грузов, как со стороны государства, так и со стороны общества, увеличилась безопасность применения БПЛА, создана основа для разработки нормативно-правовой и нормативно-технической документации, развиваются программы и курсы для подготовки специалистов по эксплуатации БПЛА [29].

Существуют виды деятельности, в которых имеется мировой опыт использования БПЛА для доставки грузов. Среди них выделяют интернет-торговлю, почтовое обслуживание, доставку медикаментов и медицинского оборудования, розничную торговлю и общественное питание, гуманитарные операции и работу в условиях чрезвычайных ситуаций, доставку грузов в рамках промышленной кооперации, доставку военных грузов при материально-техническом обеспечении воинских формирований.

В доставке грузов электронной коммерции наиболее преуспели Китай и США. Программы по доставке грузов проводят гиганты электронной торговли: Amazon (программа Prime Air) и JD.com.

Китайская компания JD.com, занимающаяся интернет-торговлей, запустила в 2015 году экспериментальную программу доставки грузов потребителям. Цель программы – реализовать доступность продуктов электронной коммерции для сельских жителей [30]. В год совершается около 10000 полетов по доставке грузов с налетом более 3000 часов. Компания владеет флотом из 100 мультикоптеров семи типов с грузоподъемностью до 100 кг. Используется до 100 маршрутов, максимальная протяженность которых составляет около 15 км. Отмечено 70% сокращение себестоимости доставки по сравнению с наземным транспортом. Стоит отметить, что данная программа имеет статус регулярной [31].

Одним из первых крупных разработчиков транспортных БПЛА стал сервис доставки заказов Prime Air Amazon, который проводится в Великобритании с 2016 года [32]. Сервис позволяет доставить товар весом не более 2.27 кг и значительно сокращает время доставки, что связано с устранением недостатков, присущих транспортировке наземным транспортом (например, задержки на светофорах, пробки, плохое состояние дорог и др.). Управление БПЛА от взлета до посадки, как и помещение груза в транспортировочный бокс, ведётся в автоматическом режиме. Изначально сервис использовал только грузовые квадрокоптеры, однако со временем в проекте появились также гибридные дроны, которые позволили совершать полеты на дальние расстояния и осуществлять вертикальные взлеты и посадку, что необходимо в условиях плотности и высоты застроек.

В сфере почтового обслуживания проводят эксперименты крупнейшие мировые почтовые компании немецкая DHL и американская UPS [33, 34].

DHL начала проводить свои первые испытания в Германии в 2013 году. Использовался дрон Parcelcopter, доставляющий в течение недели грузы через реку Рейн. Преодолеваемое расстояние составляло 1 км. В 2014 году

применялась новая версия квадрокоптера Parcelcopter 2.0, которая в течение 3 месяцев совершала транспортировку медикаментов и предметов первой необходимости. Протяженность маршрута была 12 километров, что значительно больше, чем при первых испытаниях. Сейчас же используется третья версия квадрокоптера Parcelcopter 3.0, которая летает почти в два раза быстрее предыдущей модели, достигая 70 км/ч, и способна летать на высоте более 1000 м над уровнем моря. UPS компания экспресс доставки начала эксперименты по использованию БПЛА в 2017 году. Принцип работы схож с DHL, но присутствует небольшое отличие, заключающееся в том, что наземная станция находится на почтовом грузовом автомобиле.

Еще одним примером использования БПЛА для почтовой доставки является программа 2018 года Skyways Сингапурского университета [35]. Основная цель проекта – автоматическая доставка отправлений в условиях городской застройки и морского порта.

В России активно ведутся разработки по доставке почтовых отправлений посредством БПЛА. До конца 2021 года компании провели первые тестовые полеты по маршруту Анадырь – Угольные Копи на Чукотке. По итогам этих экспериментальных полетов стороны планировали запустить БПЛА на 20 маршрутах, что позволит доставлять до 245 тонн почты в год. «Почта России» начала беспилотную доставку по 48 маршрутам в четырех регионах: Чукотском автономном округе, Камчатском крае, Ямало-Ненецком автономном округе и Ханты-Мансийском автономном округе. В проекте планировалось использовать механизм регулирования, предусмотренный Федеральным законом «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций в Российской Федерации.

Корпорация РОСТЕХ разработала БАС вертолетного типа, именуемый БАС 200, предназначенный для выполнения разнообразных задач, включая:

- Мониторинг местности. Используется для наблюдения за окружающей средой, контроля природных ресурсов и проведения экологических исследований.

- Доставка грузов. Может эффективно выполнять задания по доставке различного рода грузов в труднодоступные или удаленные районы.
- Поисково-спасательные работы. Применяется в операциях по поиску и спасению людей, что может быть особенно полезно в условиях чрезвычайных ситуаций.
- Сельскохозяйственные работы. Может быть использован для обработки полей, наблюдения за состоянием сельскохозяйственных культур и других связанных задач [36].

Универсальность БАС 200 позволяет применять его в различных сферах, что способствует повышению эффективности и безопасности выполнения различных операций. Максимальная скорость летательного аппарата составляет 160 км/ч, коммерческая нагрузка – 50 кг.

В области медицины наиболее масштабная программа была организована в Африке, первоначально в Руанде. Разработчик компания Zipline (США), заказчик – правительство Руанды и глобальный альянс по вакцинации и иммунизации [37]. Цель проекта – срочная доставка крови, вакцины и лекарств в отдаленные районы Африки. Был оборудован распределительный центр, в состав которого входили 15 БПЛА Zipline. Доставка контейнера осуществлялась парашютным способом. Взлет – с катапульты, посадка на аэрофинишер.

Программа Matternet (США), заказчик – министерство здравоохранения Швейцарии. Цель программы – доставка крови и образцов биоткани между клиниками и лабораториями [38]. Начало регулярной эксплуатации – 2017 год. Отличие от аналогичных проектов – это первая оперативная беспилотная сеть, проложенная в городских районах плотной застройки.

Военные организации во всем мире уже давно и активно рассматривают возможности использования беспилотных комплексов для материально-технического обеспечения вооруженных формирований, поставок медикаментов, эвакуации раненых из района боевых действий. Удачным является опыт использования беспилотного вертолета K-MAX для

обеспечения подразделений Корпуса морской пехоты США в Афганистане в течении более двух лет [39]. Беспилотный вертолет K-MAX впервые был представлен в 2008 году. Он может нести максимальную полезную нагрузку в 3110 кг и имеет стоимость летного часа 1100 долларов в час. Сегодня эта разработка получила продолжение. Автономная аэронавигационная система AACUS стала более совершенной: AACUS – это автономная полетная система, способная превращать существующие армейские вертолеты (испытаны: K-MAX, Boeing H 6U, Bell UH-1H) в БПЛА. Цель проекта – предоставить вооруженным силам США поддержку в районах боевых действий с минимальной опасностью для участвующих в этом экипажей.

С февраля 2019 года в Китае начато серийное производство комплекса с транспортным БПЛА AT-200 [40]. Комплекс создан на базе девятиместного турбовинтового однодвигательного самолета P-750 XSTOL (Pacific Aerospace), выпускаемого в Новой Зеландии. Осенью 2018 БПЛА успешно завершил испытательные полеты по маршрутам в полном соответствии с требованиями Управления гражданской авиации КНР.

С 2003 по 2005 годы Командование специальных операций США приобрело пятнадцать БПЛА для доставки грузов CQ-10A SnowGoose у канадской компании Mist Mobility Integrated Systems Technology (MMIST) [41]. CQ-10A представляет собой БПЛА парапланной аэродинамической компоновки, оснащенный поршневым двигателем. Он способен нести до 260 кг полезной нагрузки и выполнять задачи на расстояние до 300 км.

Таким образом, применение групп БПЛА в задаче транспортировки грузов является актуальным как в России, так и за рубежом. Более того, можно прогнозировать, что использование гетерогенных групп БПЛА, состоящих из мультироторных вертолетов с различными эксплуатационно-техническими характеристиками для решения данной задачи, будет востребовано также в ближайшем будущем.

1.2. Информационно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

Перед формализацией задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА и исследованием существующих решений в виде информационно-алгоритмического обеспечения уместно обратиться к моделям системы управления авиаперевозками, обладающим схожими особенностями и ограничениями при применении.

Основные ограничения в задачах оптимизации управления авиаперевозками связаны с ресурсами разных типов (временными, трудовыми, материальными и финансовыми) и спросом на авиаперевозки [79]. Дополнительные ограничения могут включать минимальное количество рейсов, пропускную способность аэропортов, нормы работы экипажа и другие факторы. Важной особенностью авиаперевозок является их двойственный характер: с одной стороны, необходимо полностью удовлетворять спрос на авиаперевозки, а с другой — обеспечивать прибыльность и рентабельность. Это приводит к необходимости решить задачу максимизации удовлетворения спроса при заданных расходах на ресурсы, которая представляет собой в математическом виде двойственную задачу на минимакс.

Активно применяемой бизнес-моделью в отрасли авиаперевозок является модель авиаперевозок «ось–спицы» («hub-and-spoke») [80]. В модели один из аэропортов, входящих в сеть, используется в качестве пересадочного узла для организации перевозок между другими, менее крупными аэропортами этой сети. Перед тем, как авиакомпания внедрит модель «ось-спицы», ей предстоит решить ряд важных задач:

- распределение летательных аппаратов по авиалиниям с учетом объемов прямых и трансферных пассажиропотоков;
- определение недельной частоты рейсов, выполняемых самолетами;

– распределение рейсов по времени, чтобы учесть их последовательные прибывания и отправления в хабе [81, 82].

Данная модель с хабами и стоками используется в [43], где представлена обобщенная модель задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов группой БПЛА:

1) Множество источников $S = \{S_1, S_2, \dots\}$. Каждый источник S_i характеризуется набором параметров SP_i, в которые входят координаты центра, площадь, наличие возможности отправлять и принимать конкретные типы БПЛА, наличие возможности обслуживать поддерживаемые типы БПЛА.
2) Множество стоков $D = \{D_1, D_2, \dots\}$. Каждый сток D_j характеризуется набором параметров DP_j, в которые входят координаты центра, площадь, наличие возможности отправлять и принимать конкретные типы БПЛА, наличие возможности обслуживать поддерживаемые типы БПЛА.
3) Множество промежуточных пунктов $Q = \{Q_1, Q_2, \dots\}$ (технического обслуживания, дозагрузки и т.д.). Каждый такой пункт Q_r характеризуется набором параметров QP_r, в которые входят координаты центра, площадь, наличие возможности отправлять и принимать конкретные типы БПЛА, наличие возможности обслуживать поддерживаемые типы БПЛА.
4) Множество грузов различных типов $G = \{G_1, G_2, \dots\}$. Каждый тип груза G_k характеризуется набором параметров GP_k, в которые входят тип груза, масса груза, габариты груза, возможность транспортировки по частям, минимальная и максимальная поддерживаемая температура при транспортировке, стоимость и/или др. характеристики.
5) Матрица $T^S = \|T(S_i, G_k)\|$, элементы которой задают величины запасов груза k-го типа в источнике S_i. Предполагается, что $T(S_i, G_k) \geq 0$ ($S_i \in S, G_k \in G$).

6) Матрица $T^D = \|T(D_j, G_k)\|$, элементы которой задают величины потребностей в грузе k-го типа в стоке D_j. Предполагается, что $T(D_j, G_k) \geq 0$ ($D_j \in D, G_k \in G$). $W = \|W(D_j, G_k\|$ – матрица, задающая приоритетность доставки груза k-го типа в сток D_j.
7) $A = \{A_1, A_2, \ldots\}$ – множество транспортных средств (БПЛА). Каждое транспортное средство A_l характеризуется набором параметров A_{Pl}, в которые входят тип БПЛА, крейсерская скорость, скорость взлета и скорость посадки, поддерживаемые способы погрузки и разгрузки, максимальная грузоподъемность, среднее время работы батареи и/или др. характеристики.
8) $Z = \|V(S_i \cup D_j \cup Q_r, A_l)\|$ – матрица распределений БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Элементы матрицы задают количество единиц БПЛА l-го типа, находящихся в текущий момент в каждом из перечисленных пунктов.

Задается R – маршрутная сеть, определенная на основе исходных данных и заданная следующим набором параметров:

$$R = \langle S, D, Q, \Gamma, C, U \rangle, \tag{1.1}$$

где $\Gamma = \{ \Gamma_f \}$ – карта (граф) маршрутов с привязкой к координатам;

$C = \{ \|C_f(A_l, Y_p)\| \}$ – множество матриц, задающее затраты ресурсов из множества $Y = \{Y_p\}$ при использовании транспортного средства A_l на маршруте Γ_f;

$U = \|U(A_l, \Gamma_f)\|$ – матрица дополнительных ограничений маршрутной сети, которые могут включать в себя ограничения по пропускной способности отдельных маршрутов, «запрещенные» маршруты и т.п. Ограничения могут быть различными для разных типов БПЛА.

Вводится понятие элемента сценария $x_{k,f,l}$, под которым имеется в виду транспортировка заданного количества единиц груза G_k по маршруту Γ_f с использованием транспортного средства A_l.

В результате решения задачи требуется разработать сценарий транспортировки грузов из источников в стоки так, чтобы удовлетворить потребности стоков, учитывая территориальное расположение источников и стоков, доступность и технические характеристики БПЛА, состояние маршрутной сети.

Авторы представляют сценарий транспортировки грузов следующим образом:

$$X = \{x_{k,f,l} = x(G_k, \Gamma_f, A_l) \mid G_k \in G, \Gamma_f \in \Gamma, A_l \in A)\}, \quad (1.2)$$

а задачу планирования и оптимизации транспортировки грузов в виде:

$$E(X, R, T^S, T^D, W, Z) \to \max, X \in X_F, \quad (1.3)$$

где $E = \{E_1, E_2, \ldots\}$ – векторный критерий эффективности сценариев по выбранному множеству показателей, включающие в себя экономические показатели, показатели состояния и технических параметров группы БПЛА, показатели полетных заданий и/или др.;

X_F – множество допустимых сценариев, выполняющих следующие требования:

- удовлетворение системе ограничений маршрутной сети;
- допустимость использования БПЛА определенного типа для транспортировки соответствующего груза;
- доступность БПЛА для перевозки конкретного груза;
- согласованность сценария с распределением запасов и потребностей по всем видам грузов во всех источниках и стоках.

Авторы [43] разбивают задачу (1.3) в виду её сложности и наличия большого числа параметров на несколько взаимосвязанных задач поиска, оптимизации и выбора решений:

1) формирование плана транспортировки грузов;
2) выбор транспортных средств с заданными характеристиками;
3) формирование плана загрузки транспортных средств;
4) оптимизация размещения грузов в грузовых отсеках;
5) распределение транспортных средств по маршрутам;
6) оценка и выбор оптимального сценария.

Информационная модель задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов, предложенная авторами [43], представлена на Рис. 1.1.

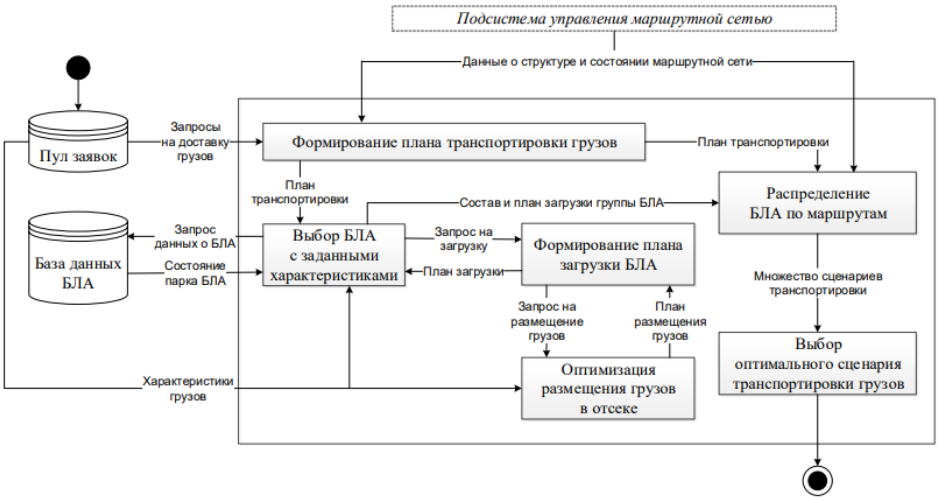


Рисунок 1.1. Информационная модель планирования и оптимизации транспортировки грузов

Рассмотрим подробнее, какие алгоритмы, а также информация, методы и средства её обработки могут входить соответственно в состав алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом представленной обобщенной модели.

Построение маршрутной сети. Для построения маршрутной сети на основе исходных данных необходимо:

- сформировать матрицу U дополнительных ограничений маршрутной сети;
- задать множество матриц C, определяющих затраты ресурсов при использовании транспортных средств на маршрутах;
- сформировать граф Γ маршрутов с привязкой к координатам.

Рассмотрим существующие метеорологические ограничения и затраты ресурсов, определенные при построении маршрутной сети.

В работах [44, 45] в качестве ограничений сети выступают метеорологические ограничения, связанные с влиянием ветра на полет БПЛА. Ветер характеризуется своей скоростью и направлением. Постановка решаемой задачи заключается в том, что при заданной скорости БПЛА, а также метеорологической информации о скорости и направлении ветра, которое определяется углом между прямыми – курсом полета и курсом воздушного потока, в зоне полета требуется найти наискорейший, замкнутый, связный и не имеющий петель маршрут облета всех n заданных своими координатами на земной поверхности точек. Математическая постановка задачи определяется следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} t_{ij}x_{ij} \to min, i \neq j, \tag{1.4}$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \ (j = \overline{1,n}; i \neq j) \\ \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \ (i = \overline{1,n}; i \neq j) \end{cases}, \tag{1.5}$$

где $x_{ij} \in \{0,1\}$ определяют наличие полета БПЛА из точки маршрута с номером i в точку маршрута с номером j, а t_{ij} – время полета из точки маршрута с номером i в точку маршрута с номером j. Затраты ресурсов задаются временными затратами на доставку грузов по маршрутам.

В исследовании [46] была предложена модель управления и поведения массива БПЛА в местности с плотной застройкой, которая помогла снизить влияние ветра на БПЛА и повысить безопасность полета. Ветер здесь определяется также скоростью и направлением, однако направление ветра среди зданий может постоянно изменяться. Усиление ветра происходит на вершинах холмов, а ослабление – за препятствиями, на подветренных склонах и на вогнутых формах рельефа. Более того ветры могут объединяться и превращаться в сильные порывы.

В исследованиях [47-52] построенная маршрутная сеть также содержит данные о направлении и скорости ветра на различных маршрутах, где осуществляется полет БПЛА, используемые для формирования метеорологических ограничений маршрутной сети.

Для формирования графа маршрутов используют алгоритмы поиска кратчайшего пути на графах [89-91]. Основные из них, формирующие граф из n вершин и m ребер, представлены в сравнительной Табл. А.2.

Формирование плана транспортировки грузов. Определяется, какие доступные на текущий момент в транспортной сети маршруты следует задействовать для транспортировки грузов, и какое количество единиц груза каждого типа подлежит транспортировке по выбранным маршрутам с учетом заданного критерия.

Чтобы определить используемые для решения задачи формирования плана транспортировки грузов алгоритмы, необходимо понять тип решаемой оптимизационной задачи, а также выбрать критерий, по которому вычисляется показатель оценки эффективности.

Существующая формализация оптимизационной задачи с критерием в виде суммарных затрат представлена в [8].

Пусть транспортная сеть состоит m источников (A_1, A_2, …, A_m), n стоков (B_1, B_2, …, B_n) и r промежуточных пунктов (C_1, C_2, …, C_r). Предположим вначале, что транспортируемый в данной сети груз является однородным или взаимозаменяемым. В этом случае должны быть заданы величины $a_i > 0$ запаса груза в источниках A_i ($i = 1, \ldots, m$), объемы потребностей $b_j > 0$ в грузе в стоках B_j ($j = 1, \ldots, n$), а также объемы дополнительных потребностей c_t в грузе в промежуточных пунктах (на складах) C_t ($t = 1, \ldots, r$). При этом если $c_t > 0$, то это означает, что на соответствующем складе имеется фактическая потребность в грузе (например, в связи с необходимостью сделать резерв), а $c_t < 0$ означает, что на складе имеется запас груза (т.е. отрицательная величина дополнительной потребности связана с избытком). В свою очередь $c_t = 0$ означает, что данный промежуточный пункт является транзитным.

Пусть заданы средние затраты d_{it} на транспортировку единицы груза из источника A_i в промежуточный пункт C_t, а также средние затраты q_{tj} на транспортировку единицы груза из промежуточного пункта C_t в сток B_j.

Пусть в сети может транспортироваться p видов груза (G_1, G_2, …, G_p), тогда запасы и потребности различных видов груза будут заданы следующим образом:

а) $a_{ik} > 0$ – запасы груза G_k в источниках A_i ($i = 1, \ldots, m$; $k = 1, \ldots, p$);

б) $b_{jk} > 0$ – объемы потребностей в грузе G_k в стоках B_j ($j = 1, \ldots, n$; $k = 1, \ldots, p$);

в) c_{tk} – объемы дополнительных потребностей в грузе G_k в промежуточных пунктах C_t ($t = 1, \ldots, r$; $k = 1, \ldots, p$).

Заданы средние затраты d_{itk} на транспортировку единицы груза G_k из источника A_i в промежуточный пункт C_t, а также средние затраты q_{tjk} на транспортировку единицы груза G_k из промежуточного пункта C_t в сток B_j.

Соответственно, переменные задачи будут иметь вид:

а) x_{itk} – количество единиц груза G_k, транспортируемого из источника A_i в промежуточный пункт C_t,

б) y_{tjk} – количество единиц груза G_k, транспортируемого из промежуточного пункта C_t в сток B_j.

С учетом введенных обозначений оптимизационная модель приобретает следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{t=1}^{r}\sum_{k=1}^{p} d_{itk}x_{itk} + \sum_{t=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{p} q_{tjk}y_{tjk} \to min, \tag{1.6}$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{r} x_{itk} = a_{ik}\ (i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p); \\ \sum_{t=1}^{r} y_{tjk} = b_{jk}\ (j = 1, \dots, n;\ ; k = 1, \dots, p); \\ \sum_{i=1}^{m} x_{itk} - \sum_{j=1}^{n} y_{tjk} = c_{tk}\ (t = 1, \dots, r; k = 1, \dots, p); \\ x_{itk} \geq 0\ (i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, r; k = 1, \dots, p); \\ y_{tjk} \geq 0\ (t = 1, \dots, r;\ j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, p). \end{cases} \tag{1.7}$$

При отсутствии каких-либо дополнительно заданных условий и ограничений данная задача распадается на p независимых транспортных задач с промежуточными пунктами для каждого вида груза. Основными при решении такой задачи являются Венгерский алгоритм и метод потенциалов [89, 90]. Их вычислительная сложность и особенности применения с учетом m числа операций представлены в Табл. А.3.

Эффективность плана транспортировки грузов может также оцениваться не суммарными издержками, а временем, затрачиваемым на его реализацию (например, в ситуации при транспортировке скоропортящихся продуктов). В этом случае план транспортировки грузов оценивается временем прохождения транспортным средством наиболее продолжительного

маршрута, а задача оптимизации сводится к задаче о нахождении многополюсных кратчайших цепей. Постановка задачи планирования транспортировки грузов с таким критерием эффективности была представлена ранее в (1.4), (1.5). Для ее решения они использовали метод с последовательным исключением подциклов [91]. Другие методы решения задачи представлены в [92, 93], основные из которых отражены в Табл. А.2.

Выбор транспортных средств с заданными характеристиками. Решается задача определения БПЛА, входящих в группу и способных осуществлять доставку, следуя найденному плану транспортировки грузов. Лицом, принимающим решение (ЛПР), выдвигается ряд требований, определяющих допустимость использования БПЛА определенного типа для транспортировки соответствующих грузов. В результате выбора транспортных средств с заданными характеристиками определяются БПЛА, участвующие в решении задачи распределения БПЛА по маршрутам. Требования могут отсутствовать, в таком случае все имеющиеся БПЛА считаются допустимыми для транспортировки соответствующих грузов.

Для формализации этапов алгоритма может быть задействован математический аппарат теории нечетких множеств, который основывается на расширении классического понятия множества [94]. Это обобщение позволяет более точно и полно описывать объекты, имеющие неопределенные или нечетко определенные границы [95]. С этой целью вводится понятие нечеткого множества, которое определяют как совокупность пар:

$$A = \{< \mu_A(x), x >\}, \tag{1.8}$$

где X – произвольное множество;

μ_A – функция, определенная на множестве X и принимающая значения на отрезке [0,1].

Для критериального оценивания используют алгоритмы, основанные на индексах сравнения нечётких множеств [96]. Выделяют три типа индексов,

отражающих насколько та или иная альтернатива удовлетворяет заданному критерию:

1) *Индекс частичного совпадения* определяет степень истинности утверждения «пересечение множеств A и B не пусто». Примером такого индекса является

$$P(A,B) = \max_{u \in U} min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}. \quad (1.9)$$

2) *Индекс включения* определяет степень истинности утверждения «любой элемент множества A принадлежит множеству B». Примером такого индекса является индекс

$$I(A,B) = \frac{|A \cap B|}{|A|}. \quad (1.10)$$

3) *Индекс частичного совпадения* определяет степень истинности утверждения «любой элемент множества A принадлежит множеству B и наоборот». Примером индекса частичного совпадения является индекс

$$S(A,B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}. \quad (1.11)$$

Для синтеза обобщенных оценок предпочтительности альтернатив используют алгоритмы, представленные в Таблице А.4 [97].

Формирование плана загрузки транспортных средств. В результате решения данной задачи, для каждого источника определяется план загрузки транспортных средств, определяющий количество единиц груза, транспортируемого по определенным маршрутам на определенных транспортных средствах так, чтобы целевая функция, представленная некоторым множеством показателей, приобретала оптимальное значение [43].

Авторы выделили среди параметров, характеризующих каждый тип груза массу единицы i-го груза p_i, а также обозначили:

d_i $(i = 1, \dots, M)$ – количество единиц i-го груза, предназначенного для транспортировки, причём M – количество грузов;

P – грузоподъемность БЛА;

H – объем грузового отсека.

Предполагается, что x_i $(i = 1, \dots, M)$ – количество единиц i-го груза, загружаемого в транспортное средство. План загрузки БПЛА задается как $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$.

Возможны следующие критерии качества плана загрузки БПЛА:

1) Предпочтительность $F(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_M)$, отражающая «полезность» плана транспортировки грузов. Представлен пример предпочтительности, связанной с оценкой приоритетности доставки каждого типа груза.

$$\mathrm{F}(X) = \sum_{i=1}^{M} f_i(x_i), \tag{1.12}$$

где $f_i(a)$ – функция, оценивающая приоритетность доставки i-го груза в количества a единиц.

2) Степень использования объема грузового отсека. Представлен пример показателя оценки заполненности грузового отсека, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда:

$$H(X) = \frac{V(X)}{H}, \tag{1.13}$$

где $V(X)$ – объем параллелепипеда, описанного вокруг полученного размещения грузов в пространстве;

H – объём всего параллелепипеда.

В простейшем случае задача выглядит следующим образом:

$$F(X) \to max, \tag{1.14}$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{M} p_i x_i \le P\,; \\ H(X) \le 1; \\ 0 \le x_i \le d_i \ (i = 1, \dots, M); \\ x_i \in Z \ (i = 1, \dots, M). \end{cases} \tag{1.15}$$

Точные и эвристические алгоритмы целочисленной оптимизации представлены в Таблице А.5 [92, 93].

Оптимизация размещения грузов в грузовых отсеках. Задача связана с поиском вариантов рациональной загрузки БПЛА, где под рациональностью понимается полнота использования штатного грузового объема и грузоподъемности БПЛА [43].

В качестве показателя может рассматриваться отношение объема пространства, занимаемого грузами, к возможному объему грузов [94]. В таком случае задача может быть представлена в виде так называемой задачи трехмерной ортогональной упаковки объектов [98]. В общем случае постановка данной задачи имеет следующий вид.

Имеется набор N ортогональных контейнеров (штатных грузовых объемов) с габаритными размерами $\{U_j, V_{j,} W_j\}$ (j=1,…, N) и набор m ортогональных объектов (грузов) с габаритными размерами $\{u_i, v_{i,} w_i\}$ (i=1,…,m). Обозначим положение i-го объекта в j-м контейнере вектором $(x_{ij}, y_{ij,} z_{ij})$. Необходимо разместить все объекты в минимальном числе контейнеров. Обозначим объем контейнеров через V, а число размещаемых объектов через n. Постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot y_i \cdot z_i}{V} \rightarrow max, \quad (1.16)$$

при дополнительных условиях:

1) ребра размещенных в контейнере объектов параллельны ребрам этого контейнера;
2) упакованные объекты не перекрывают друг друга, т.е. $\forall j = 1, \dots, N, \forall i = 1, \dots, m, \forall k = 1, \dots, m$ должны выполняться условия:

$$\left(x_{ij} \geq x_{kj} + u_k\right) \vee \left(x_{kj} \geq x_{ij} + u_i\right); \quad (1.17)$$

$$\left(y_{ij} \geq y_{kj} + v_k\right) \vee \left(y_{kj} \geq y_{ij} + v_i\right); \quad (1.18)$$

$$\left(z_{ij} \geq z_{kj} + w_k\right) \vee \left(z_{kj} \geq z_{ij} + w_i\right); \quad (1.19)$$

3) упакованные объекты не выходят за границы контейнера, т.е. $\forall j = 1, \dots, N, \forall i = 1, \dots, m$, должны выполняться условия:

$$\left(x_{ij} \geq 0\right) \wedge \left(x_{ij} + u_i \leq U_i\right); \quad (1.20)$$

$$\left(y_{ij} \geq 0\right) \wedge \left(y_{ij} + v_i \leq V_i\right); \quad (1.21)$$

$$\left(z_{ij} \geq 0\right) \wedge \left(z_{ij} + w_i \leq W_i\right). \quad (1.22)$$

Распределение транспортных средств по маршрутам. Предпоследним шагом решения задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов является распределение транспортных средств по маршрутам, в результате которого с учетом периода планирования T_H формируется сценарий

транспортировки грузов в виде распределения транспортных средств по маршрутам с заданием плана загрузки и размещением грузов на БАС [43]. Поиск сценария осуществляется решением оптимизационной задачи, в которой в роли целевых показателей выступают затраты различных типов ресурсов.

Выбор конкретного набора показателей эффективности зависит от конкретных условий транспортировки, текущего состояния маршрутов и транспортной сети и распределения заявок на доставку грузов потребителям [94]. Ими могут быть качество, экономичность, действенность, производительность, прибыльность, результативность и др. критерии, а также их комбинации.

С одной стороны, эффективность сравниваемых вариантов перевозок может быть оценена длительностью простоев в пунктах погрузки и разгрузки. С другой стороны, можно учитывать экономическую эффективность. В раздел экономических факторов, влияющих на экономическую эффективность транспортировки грузов, могут включаться транспортные затраты, являющиеся частью транспортно-заготовительных расходов, и затраты на транспортировку продукции от мест производства до непосредственных потребителей. Уровень прироста затрат может зависеть от отношения размера производственного предприятия к емкости обслуживаемого рынка, метода ценообразования, географической структуры транспортных затрат, географией размещения заказчиков, отношения производственных затрат к физическому объему единицы продукции.

Для перевозчика экономическая эффективность может быть оценена следующими показателями:

- величина дохода, выручка от оказания транспортных услуг;
- затраты на оказание транспортных услуг, включая санкции за недостачу или повреждение товара, просрочку в доставке и другие случаи невыполнения перевозчиком своих обязательств;

- финансовый результат от оказания транспортных услуг (прибыль от перевозок);
- прибыль на рубль затрат (рентабельность перевозок).

Точная оценка увеличения и снижения доходов за счет изменения уровня качества оказываемых услуг затруднена. Более того, предпочтение должно отдаваться относительным измерителям, которые обеспечивают сопоставимость оценки эффективности транспортировки различных товаров в различных условиях, определяя степень её экономичности.

Себестоимость авиаперевозок рассчитывается как частное от деления суммы установленных нормативными документами расходов на объем перевозок в виде: кресло-километров, пассажиро-километров, налет часов, тонно-километров, предельных тонно-километров по парку воздушных судов в целом по авиапредприятиям или по отдельным типам летательных аппаратов [99]. Поскольку кресла и пассажиры для БПЛА отсутствуют, можно рассматривать себестоимость перевозок посредством БПЛА в виде тонно-километров.

Возможно использование комбинированного показателя оценки эффективности транспортировки грузов посредством БПЛА, заданного в виде показателя стоимостной оценки отсутствия простоя БПЛА, учитывающего степень экономичности перевозок и эффективность БПЛА, выраженную суммарным простоем БПЛА [94].

Математическая постановка задачи распределения БПЛА по маршрутам с учетом [94, 100] выглядит следующим образом.

Вводятся обозначения:

1) N – число узлов транспортной сети;
2) d_{ij} (i, j =1, ..., N) – расстояние между i-м и j-м узлами транспортной сети;
3) a_{ij} (i, j =1, ..., N) – объем груза, необходимого для транспортировки из i-го узла транспортной сети в j-й узел в течение всего периода планирования;

4) S_i^{max} (i =1, ..., N) – максимальное количество БПЛА, которое может принять i-й узел транспортной сети в течение всего периода планирования;
5) Q_i^{max} (i =1, ..., N) – максимальное количество БПЛА, которые могут базироваться в i-м узле транспортной сети в течение всего периода планирования;
6) K – общее количество доступных БПЛА;
7) V_k (k = 1, …, K) – набор технических и эксплуатационных параметров k-го БПЛА;
8) b_k (k = 1, …, K) – вместимость k-го БПЛА;
9) c_k (k = 1, …, K) – удельные затраты на эксплуатацию k-го БПЛА на единицу времени;
10) L_k (k = 1, …, K) – максимально допустимое количество перелетов, которое может выполнить k-й БПЛА в течение периода планирования (данное ограничение может быть обусловлено техническими требованиями и/или опытом эксплуатации БПЛА соответствующего типа);
11) $l(k)$ ($l(k)$ = 1, …, L_k) – показатель, задающий номер перелета, выполняемого k-м БПЛА;
12) h_{ij}^k (k = 1, …, K; i, j =1, ..., N) – индикатор допустимости перелета, принимает значение 1, если k-й БПЛА может совершить перелет из i-го узла транспортной сети в j-й узел, и 0 – иначе (при этом $h_{ii}^k = 0 \; \forall i = 1, \dots N, k = 1, \dots, K$);
13) T – продолжительность периода планирования;
14) TP^k – время, требуемое для выполнения операций по обслуживанию k-го БПЛА перед вылетом и после завершения перелета;
15) T_{ij}^k (k = 1, …, K; i, j =1, ..., N) – средняя продолжительность перелета k-го БПЛА из i-го узла транспортной сети в j-й узел (данная величина определяется на основе расстояний между узлами и скоростными характеристиками БПЛА конкретного типа).

Переменными задачи являются бинарные величины:

$x_{i,j,l(k)}^{k}$ (k =1, …, K; i, j =1, ..., N; $l(k)$ =1, …, L_k) – индикатор выполнения k-м БПЛА перелета с номером $l(k)$ из i-го узла транспортной сети в j-й узел.

Требуется минимизировать суммарные затраты на транспортировку груза в течение периода планирования:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(c_k \cdot x_{i,j,l(k)}^{k} \cdot T_{i,j}^{k}\right) \to min, \tag{1.23}$$

при ограничениях:

1) Бинарные переменные, соответствующие перелету из узла транспортной сети в тот же самый узел, тождественно равны нулю:

$$x_{i,i,l(k)}^{k} = 0 \ (k=1, \ldots, K;\ i=1, \ldots, N;\ l(k)=1, \ldots, L_k). \tag{1.24}$$

2) БПЛА не может выполнять более одного перелета одновременно:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \le 1 \ (k = 1, \ldots, K; l(k) = 1, \ldots, L_k). \tag{1.25}$$

3) Последовательность выполняемых каждым БПЛА перелетов должна начинаться с перелета, имеющего номер 1, и не должна иметь разрывов:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)+1}^{k} \le \sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \tag{1.26}$$

$$(k = 1, \ldots, K; i = 1, \ldots, N;\ l(k) = 1, \ldots, L_k - 1).$$

4) После завершения очередного перелета БПЛА может совершить следующий, по одному из разрешенных для него маршрутов, либо остаться в пункте базирования:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \le \left(1 - \sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)+1}^{k}\right) + \sum_{j=1}^{N} \left(h_{i,j}^{k} \cdot x_{i,j,l(k)+1}^{k}\right) \quad (1.27)$$
$$(k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N;\ l(k) = 1, \dots, L_k - 1).$$

5) Путем преобразований можно получить более простую форму записи для данного ограничения:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \le 1 - \sum_{j=1}^{N} \left(x_{i,j,l(k)+1}^{k} \cdot \left(1 - h_{i,j}^{k}\right)\right). \quad (1.28)$$

6) Ограничения на пропускную способность узлов транспортной сети:

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \le S_j^{max}\ (j = 1, \dots, N). \quad (1.29)$$

7) Ограничения на количество БПЛА, приписанных к каждому пункту базирования:

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)=1}^{k} \le Q_i^{max}\ (i = 1, \dots, N). \quad (1.30)$$

8) Суммарное время пребывания БПЛА на маршруте ограничено продолжительностью периода планирования:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j,l(k)=1}^{k}\cdot TP^{k}\right)+\sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j,l(k)}^{k}\cdot\left(T_{i,j}^{k}+TP^{k}\right)\right)\le T \quad (1.31)$$

$$(k=1,\dots,K).$$

9) В конце периода планирования каждый БПЛА должен оказаться в пункте базирования:

$$\sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{j=1}^{N}x_{i,j,l(k)}^{k}=\sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{j=1}^{N}x_{j,i,l(k)}^{k} \quad (1.32)$$

$$(k=1,\dots,K;\ i=1,\dots,N).$$

10) Условие транспортировки всего имеющегося запаса груза:

$$a_{ij}-\sum_{k=1}^{K}\sum_{l(k)=1}^{L_k}\left(x_{i,j,l(k)}^{k}\cdot b_k\right)\le 0\ (i,j=1,\dots,N). \quad (1.33)$$

Полученная оптимизационная задача относится к задачам бинарной линейной оптимизации. Размерность задачи определяется количеством узлов транспортной сети, количеством имеющихся в распоряжении БПЛА, а также максимально допустимым числом перелетов. В случае большой размерности поиск точного решения поставленной задачи будет малоэффективным, поэтому необходимо использовать эвристические либо метаэвристические алгоритмы. Преимущества и недостатки алгоритмов отражены в Табл. А.6.

Отдельно стоит, упомянуть эвристические алгоритмы - The Clarke & Wright [59], Sweep [60] и метаэвристические алгоритмы - генетический [101] и муравьиный [102], которые используются в разработанном алгоритмическом обеспечении в Главах 3 и 4, поскольку они позволяют находить глобальные

оптимальные решения за разное время при небольшом количестве вершин и обладают разными особенностями применениями.

Более того, конкретизируем генетический и муравьиный алгоритм, поскольку в данных классах алгоритмов существуют различные их вариации.

Используется General Genetic Algorithm (GGA), предполагающий, что, если размер популяции равен P, создается и мутируется P потомков [103]. После этого происходит замена всех родителей их потомками. В этом случае элитарность равна 0. Для каждого потомства случайным образом выбираются два родителя из существующей популяции, и процесс повторяется до тех пор, пока количество потомков не достигнет текущего размера популяции. Каждый член текущей популяции уничтожается, и остается ноль выживших.

В качестве муравьиного алгоритма используется модификация Ant Colony System (ACS) [104]. Она обладает тремя выделяющимися особенностями:

1. Уровень феромонов на ребрах обновляется в конце очередной итерации и при каждом переходе муравьев в новый узел.
2. Уровень феромонов в конце итерации повышается только на кратчайшем пути, который был найден.
3. Измененное правило перехода, согласно которому присутствует выбор классического (общего) варианта алгоритма и выбор с определенной долей вероятности в соответствие с длиной и уровнем феромонов.

Оценка и поиск оптимального сценария. Решается задача комплексной оценки сформированных сценариев по набору критериев и выбора на основе этого наиболее предпочтительного сценария или сценариев [43]. Для решения задачи можно использовать математический аппарат теории нечетких множеств, алгоритмы критериального оценивания и синтеза обобщенных оценок, представленные ранее для задачи выбора транспортных средств с заданными характеристиками.

Приведенные в текущем разделе алгоритмы, информация, методы и средства её обработки можно использовать при разработке информационного

и алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

1.3. Функционирование АМИС в неблагоприятных условиях

Рассмотрим, какие существуют структуры АМИС с целью выяснить её рабочие элементы, способные выйти из строя в случае неблагоприятных условий.

В [65] в состав АМИС входит:

1) Аэродромная метеорологическая станция. Собирает сведения о скорости и направлении ветра у земли, температуре воздуха у земли, относительной влажности, давлении, яркости фона и метеорологической дальности видимости.
2) Метеорологическая радиолокационная станция ближней аэродромной зоны. Осуществляет обзор пространства, обнаружение, измерение контуров и параметров перемещения метеорологических объектов, классификацию метеорологических явлений на дальностях до 100-120 км, а также аналогично для зон опасной турбулентности и обледенения.
3) Ветровой лидар. Формирует данные о зонах облачности, осадках, опасных для авиации метеоявлений, определяет профиль и сдвиг ветра.
4) Температурный профилемер. Формирует данные о профиле температуры до высоты 1000 м от уровня установки.
5) Аэродромная система радиозондирования атмосферы. Измеряет профили температуры, относительную влажность, направление и скорость ветра до высот порядка 1000 м.
6) Вычислительно управляющий компонент, состоящий из системы приема и передачи метеоданных, а также системы управления и индикации метеорологической информации.

Структурная схема представлена на Рис. 1.2.

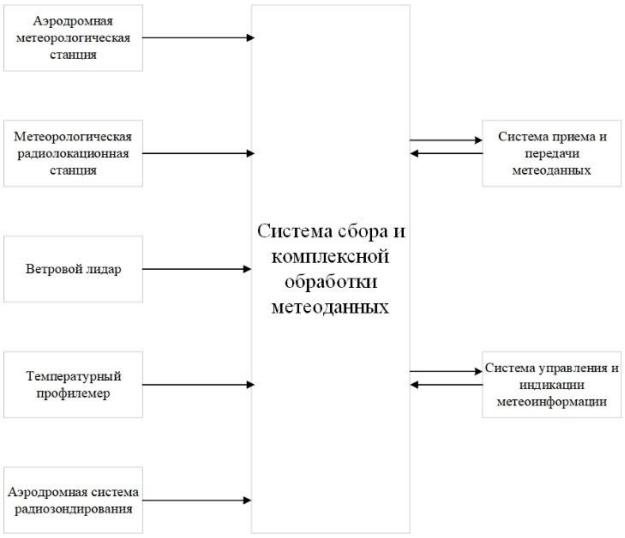


Рисунок 1.2. Пример структурной схемы АМИС

В [66] в состав АМИС входят концептуально ядро системы и модули приземных метеорологических наблюдений. Концептуальная схема взаимодействия объектов АМИС и программных модулей представлена на Рис. 1.3.

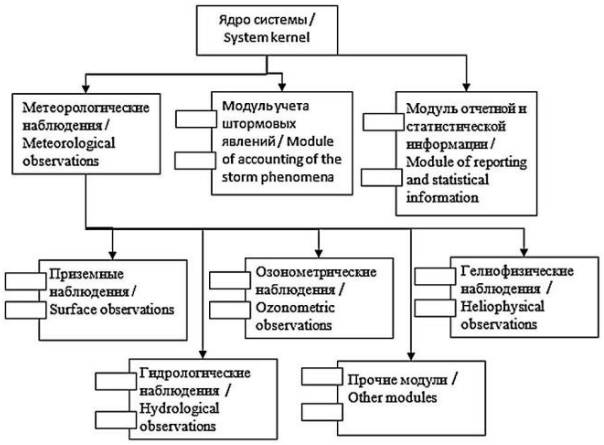


Рисунок 1.3. Пример концептуальной схемы взаимодействия объектов АМИС и программных модулей

Отдельно стоит отметить гибкость АМИС, позволяющую интегрировать её отдельные модули в уже существующие АМИС, а также присутствие в структуре АМИС модуля отчетной и статистической информации, который может содержать статистическую информацию о метеорологических изменениях.

В [67] структура АМИС представлена как на Рис. 1.4, при этом для обеспечения надежности в рабочую станцию должно входить как минимум 2

компьютера с комплектами устройств для ввода информации и устройства вывода. Один из компьютеров используется только для приема и передачи данных, а другой для их обработки.

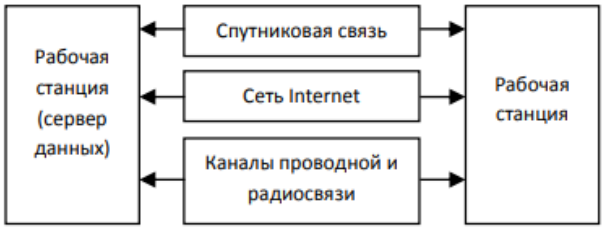


Рисунок 1.4. Пример структурной схемы АМИС

В [68] в состав АМИС входят:

1) Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «МетеоЯчейка», состоящие из метеорологических радиолокаторов, комплекта технических средств автоматизации получения информации, центральной системы, специализированных рабочих станций.
2) Комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция КРАМС-4.
3) Автоматизированная информационная система «Метеосервер».
4) Центр коммутации сообщений «МетеоТелекс».
5) Автоматизированная система управления воздушным движением.

Структурная схема в данном случае представлена на Рис. 1.5.

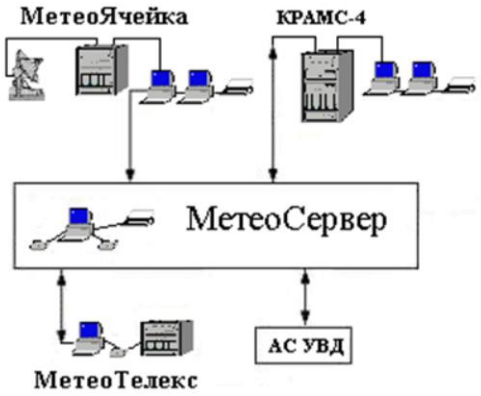


Рисунок 1.5. Пример структурной схемы АМИС

В [69] представлена АМИС общего назначения «Погода», которая предназначена для автоматизации процесса наблюдений и обработки

результатов на метеорологических станциях наземной наблюдательной сети. Её структурная схема для варианта с датчиками Vaisala Oy изображена на Рис. 1.6.

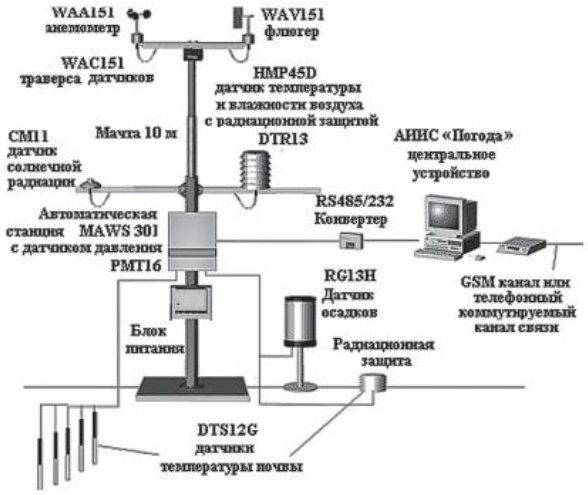


Рисунок 1.6. Структурная схема АМИС «Погода» с датчиками Vaisala Oy

Опишем предназначение используемых датчиков в системе в Табл. А.7, а особенности измерительных каналов в системе в Табл. А.8.

Перечень измеряемых метеорологических параметров вместе с желательной с точки зрения эксплуатации летательных аппаратов точностью представлен в Таблице А.9 [63].

Исследование Кузнецова И.Е., Мельникова А.В., Рогозина Е.А., Страшко О.В. [70] подтверждает необходимость учета отмеченных метеорологических параметров при планировании полета БПЛА. В исследовании представлена классификация дестабилизирующих воздействий, оказывающих неблагоприятное влияние на полет БПЛА. Среди них присутствуют метеоявления: обледенение, осадки, кучево-дождевые облака, турбулентность, и метеорологические величины: ветер, температура воздуха, влажность, давление воздуха. Для описания динамики влияния метеорологических факторов на функционирование БПЛА используются методы полумарковских процессов, позволяющие получить адекватные модели случайных процессов с последействием и произвольными законами распределения переходных характеристик. Показано, что при доставке грузов

с учетом дестабилизирующих воздействий эффективность функционирования БПЛА со временем снижается.

Основными характеристиками ветра являются: направление/часть горизонта откуда дует ветер в градусах и скорость, измеряемая в м/с [63]. Для характеристики ветра определяется средняя скорость и среднее направление. Также отмечаются порывы по отношению к средней скорости в случае отличия на 3 м/с, если ветер боковой, и в остальных случаях через 5 м/с [105].

Данные о видимости при взлете учитываются вдоль взлетно-посадочной полосы, а при приземлении – для зоны приземления [63].

Данные о дальности видимости на взлетно-посадочной полосе предоставляются при взлете и посадке по приборам, где используются светосигнальные системы огней высокой интенсивности и/или огни малой интенсивности.

Собирается информация об особых явлениях текущей погоды и их характеристиках в соответствии с кодовыми обозначениями. Среди особых явлений погоды стоит отметить наличие осадков, в том числе наличие снега и наличие дождя.

В исследовании [71] отмечено, что учет погодных условий имеет решающее значение для обеспечения беспилотной доставки в чрезвычайных ситуациях. Неблагоприятные погодные условия, такие как сильный ветер и осадки, могут существенно повлиять на полет БПЛА. Например, при увеличении количества осадков лучше прекратить полет, иначе БПЛА получит значительные повреждения, что приведет к увеличению общих затрат. В зависимости от периодически получаемых погодных данных, таких как ветер и дождь, система может принять решение о продолжении полета или об отзыве дрона на склад.

Дождь может осложнить полет летательного аппарата и даже приводить к тяжелым авиационным происшествиям [72]. Капли дождя могут частично блокировать отверстие приемника воздушного давления и вызвать занижение скорости. В следствие трения капель дождя о поверхность летательного

аппарата могут возникать значительные потенциалы статического электричества, что создает опасную ситуацию. В зонах переохлажденного дождя образуется интенсивное обледенение. Длительные дожди вызывают переувлажнение грунта и даже его размокание, выводят из строя на то или иное время грунтовые аэродромы. Ливневые дожди также резко ухудшают видимость.

Снег представляет собой твёрдые осадки в виде кристаллов разных размеров. При температуре меньше 0°С снежинки могут слипаться и становиться довольно крупными. Снег способен сталкиваться с летательным аппаратом, делая его полет затрудненным или даже невозможным. Более того, частицы снега могут таять, меняя свое состояние с твердого на жидкое, и влиять аналогично каплям дождя. Существует мокрый снег, при котором осадки состоят из таящего снега или смеси снега с дождем.

Собираются данные о количестве и высоте нижней границы облаков, значимых для полета [63]. Количество облаков отмечается с использованием сокращений: незначительно - FEW (1-2 октанта), рассеянные - SCT (3-4 октанта), значительные облака - BKN (5-7 октантов), сплошная облачность - OVC (8 октантов). Высота нижней границы облаков сообщается в величинах, кратных 30 м.

В зависимости от высоты полёта летательного аппарата и типа облачности на данной высоте полёт БПЛА может сопровождаться обледенением или тряской (слабой, умеренной, сильной), в связи с чем, полёт БПЛА будет затруднён или БПЛА может быть выведен из строя [72].

Выделяют облака верхнего, среднего и нижнего ярусов. К облакам верхнего яруса относятся перистые (Ci) и перисто-слоистые (Cs) облака, расположенные на высоте более 6000 м. К облакам среднего яруса относятся высоко-кучевые (Ac) и высоко-слоистые (As) облака, расположенные на высоте от 2000 до 6000 м. К облакам нижнего яруса относятся слоисто-кучевые (Sc), слоистые (St), слоисто-дождевые (Ns), расположенные на высоте менее 2000 м. Существуют также облака вертикального развития: кучевые

(Cu) и кучево-дождевые (Cb) облака, которые простираются по вертикали до различных высот.

Сводная информация о типе облачности и соответствующим диапазоне его нижней границы представлена в Табл. А.10. Опасность полета в зависимости от типов облаков разная. Полет в перистых облаках обычно бывает спокойным, тряска либо отсутствует, либо слабая. Обледенения, как правило, нет. Обледенение в перисто-слоистых облаках бывает очень редко. Турбулентность в облаках, как правило, слабая, обычно полет в них протекает спокойно. Для высоко-кучевых облаков турбулентность слабая или умеренная, а обледенение возможно. При длительном полете в высоко-слоистых облаках возможно обледенение, тряска отсутствует. Слабая или умеренная тряска, при длительном полете – обледенение характерны для слоисто-кучевых облаков. Для слоистых облаков тряска бывает редко, охлаждение возможно при определенных условиях. Слоисто дождевые облака связаны с тряской, которая слабая или отсутствует, а обледенение возможно в любое время года. Для кучевых облаков обледенение возможно лишь весной и осенью при отрицательной температуре в облаках, однако размеры облаков небольшие, и поэтому оно не опасно. При этом турбулентность является слабой или умеренной. Кучево-дождевые облака наиболее опасны для полетов, присутствует сильная тряска и обледенение.

Передаются данные о температуре воздуха и температуре точки росы [63]. Наличие низкой или высокой температуры местности, в которой происходит полет летательного аппарата, может также затруднить полет и привести к летным происшествиям.

В исследовании [73] определены неблагоприятные воздействия внешней среды, способные вызывать критические отказы у БПЛА. Среди них есть отрицательные температуры, вызывающие обледенение корпуса БПЛА, интенсивные осадки в виде дождя, снега, туман, сильная атмосферная турбулентность. Отмечено, что при температуре +4°С возможно обледенение лопастей винтов, передней кромки крыла, выступающих элементов полезной

нагрузки, элевонов, управляющих БПЛА во время полета. В результате обледенения увеличивается масса и разбалансировка аппарата и происходит постепенная утрата контроля над БПЛА. Для уменьшения вероятности обледенения производят обработку водоотталкивающей жидкостью наружной поверхности аппарата, однако, по опыту это эффективно лишь в 50% случаев [74]. При попадании БПЛА в зону ливневого дождя или обильного снегопада возможно резкое уменьшение высоты полета.

В исследовании Горбунова А.А., Галимова А.Ф. [75] отмечено, что обледенение в большинстве случаев происходит в воздушной среде, содержащей капли переохлажденной воды, в основном в кучевых и слоистых облаках, в условиях тумана, мороси, дождя, мокрого снега при отрицательной или околонулевой температуре наружного воздуха. Наибольшая вероятность обледенения существует в условиях повышенной влажности воздуха на малых высотах (меньше 3 км) в диапазоне температур от 0°С до -20°С и, в особенности, от -5°С до -10°С. В ходе применения БПЛА в холодный период необходимо учитывать облачность на маршруте полёта. При температуре от +5°С до -10°С попадание БПЛА в зону облачности или тумана может привести к обледенению БПЛА, нарушению его аэродинамических и весовых параметров.

Работа [76] уделяет внимание транспортировке компонентов крови с использованием БПЛА. В ходе выполнения транспортировки грузов происходил контроль над температурой местности, чтобы не допускать БПЛА к полету в неблагоприятных метеорологических условиях. Однако, данные о температуре были получены с использованием специальных устройств.

С целью обеспечения безопасности полетов в АМИС передаются также данные об измеренном атмосферном давлении, приведенные к уровню порога взлетно-посадочной полосы рабочего старта в мм рт. ст, мб, или давлении, приведенном к уровню моря для стандартной атмосферы, в зависимости от типа летательного аппарата [63].

Таким образом, обзор и анализ существующих и перспективных АМИС позволяет выявить следующие неблагоприятные условия функционирования АМИС в зависимости от получаемых измерений:

1) нарушение измерительного канала параметров ветра (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя и/или датчика ветра);
2) нарушение измерительного канала видимости (в связи с нарушением функционирования датчика метеорологической оптической дальности);
3) нарушение измерительного канала особых явлений (в том числе, в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя осадков и датчика осадков);
4) нарушение измерительного канала облачности (в связи с нарушением датчика высоты нижней границы облаков);
5) нарушение измерительного канала температуры (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя и/или датчика температура и влажности воздуха);
6) нарушение измерительного канала атмосферного давления (в связи с нарушением измерительного преобразователя и/или датчика атмосферного давления).

Рассмотрим, как обрабатывается информация с датчиков по данным измерительным каналам.

Измерительный канал параметров ветра. Расчет скользящего среднего мгновенных значений скорости и направления ветра с временным шагом, происходит по формулам:

$$\bar{V}_{\text{ветра}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{\text{мгн},i}}{n}, \tag{1.34}$$

$$\bar{D}_{\text{ветра}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{\text{мгн},i}}{n}, \tag{1.35}$$

где $\bar{V}_{\text{ветра}}$ – среднее значение скорости ветра за истекший период осреднения;

n – число измерений мгновенной скорости (и направления) ветра за осредняемый период;

$V_{\text{мгн},i}$ – значения мгновенной скорости ветра;

$\bar{D}_{\text{ветра}}$ – среднее значение направления ветра за истекший период осреднения;

$d_{\text{мгн},i}$ – значения мгновенного направления ветра.

Измерительный канал видимости. Значения скользяще округляют за истекшие 60 секунд. Происходит аналогично формулам (1.34) и (1.35), где $n = 60$.

Измерительный канал наличия особых явлений. Значения скользяще округляют за осредненный период. Происходит аналогично формулам (1.34) и (1.35).

Измерительный канал облачности. Высота нижней границы облачности определяется по следующей формуле:

$$h_{\text{гран}} = min_{i=1,\dots,15}(h_i | h_i \neq h_{min}), \tag{1.36}$$

где $h_{\text{гран}}$ – искомая высота нижней границы облачности;

h_{min} – минимальное значение высоты нижней границы облачности с датчика высоты облаков за прошедшие 15 секунд.

Измерительный канал температуры. Температура воздуха определяется следующим образом:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{60} t_{\text{мгн},i}}{60}, \tag{1.37}$$

где t – искомое значение температуры воздуха;

$t_{\text{мгн},i}$ – мгновенные значения температуры воздуха (рассматриваются за минуту).

Температура точки росы определяется по следующей формуле:

$$t_r = \frac{b(\lg r + x)}{a - \lg r - x}, \tag{1.38}$$

где t_r – температура точки росы;

a и b – коэффициенты, равные соответственно 17.5043 °C и 241.2 °C;

x вычисляется через найденную по формуле (1.37) температуру как $x = \left[\frac{at}{b+t}\right]$;

r – относительная влажность воздуха.

Измерительный канал давления. Атмосферное давление усредняется аналогично. Приведенное атмосферное давление к уровню моря производится по следующей формуле:

$$P_{\text{ум}} = P_z\left(\frac{T_{vz} + \gamma z)}{T_{vz}}\right)^{\frac{g}{R_c \gamma}}, \tag{1.39}$$

где $P_{\text{ум}}$ – атмосферное давление на уровне моря;

P_z – атмосферное давление, измеренное на высоте установки датчика;

T_{vz} – виртуальная температура воздуха на высоте станции;

z – высота установки датчика давления над уровнем моря;

γ – вертикальный градиент виртуальной температуры воздуха, принимаемый равным $\pm 0.0065\ °\text{C} * \text{м}^{-1}$;

R_c – газовая постоянная сухого воздуха, равная $287.05\ \text{м} * \text{с}^{-2} * \text{к}^{-1}$;

g – ускорение свободного падения.

Таким образом, определены модули, входящие в состав различных АМИС, и выявлены неблагоприятные условия функционирования, при

которых отсутствует расчет метеорологических параметров, в том числе наличия дождя, снега, высоты верхней границы облачности и температуры.

1.4. Методы прогностической обработки метеорологической статистической информации

При неблагоприятных условиях 3, 4, 5, представленных в конце раздела 1.3, происходит нарушение функционирования АМИС и возникают отсутствующие параметры - наличие дождя, снега, высота верхней границы облачности и температура. Возникает необходимость достоверной обработки метеоинформации при таких условиях. В текущей работе предлагается применение методов прогностической обработки статистической метеорологической информации, поддерживающих непрерывное функционирование АМИС и формирующих в оперативном режиме набор прогнозных значений. Рассмотрим методы метеорологического прогнозирования подробнее.

Если значение функции, описывающей какой-либо физический процесс, определяется в каждый момент времени по значениям ее аргументов в предшествующие моменты времени, то функция является прогностической, ее аргументы становятся предикторами, а значение функции – предиктантом [77].

Качество прогноза погоды зависит от выбора предикторов, которые формируются на основе знаний о процессах, наличия доступных баз метеорологических данных и интуиции прогнозиста.

Независимо от того, каким методом разрабатывается прогноз, в него включены субъективные допуски прогнозиста. Создание полностью объективных прогнозов в настоящее время невозможно вследствие неопределенности будущего состояния атмосферы. Усреднение параметров рационально и обеспечивает возможность прогнозирования, поскольку сами атмосферные процессы в конкретных областях непредсказуемы по своему поведению в прошлом.

Численные модели описывают состояние подстилающей поверхности в упрощенном виде, накапливают ошибки, поэтому более эффективно использовать статистические методы прогнозирования. Выделяют физико-статистические методы и статистические методы. Их особенности применения изложены в Табл. А.11.

При оперативном использовании методы статистического прогнозирования являются вспомогательными.

Статистические методы представлены в работах [78, 79]. В качестве предикторов выступают абсолютный геопотенциал *H-500*, приземное давление p_0 и температура на поверхности 850 гПа – *T-850*. Имеются сведения о сглаженном ходе температуры T_0 в течение месяца в 12 городах. Для уменьшения влияния случайных процессов и сокращения размерности предиктора применяется разложением по естественным ортогональным составляющим [106]:

$$X_{ih} = \sum_{j=1}^{p} Y_{ij} V_{jh}, \tag{1.40}$$

где X – ежедневные значения *H-500*, p_0 или *T-850* (а также T_0 в течение месяца);

Y_{ij}- собственные векторы ковариационной матрицы временного хода указанных величин;

V_{jh} - коэффициенты разложения по времени.

Коэффициенты разложения временного хода предикторов в первой декаде месяца в определенном узле географической сетки и в восьми окружающих его узлах раскладывались по пространственной координате:

$$X(x_j, \tau_k) = \sum_{h=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} L_{hk} W_k(x_j) V_h(\tau_k), \tag{1.41}$$

где $V_h(\tau_k)$ - собственные векторы ковариационной матрицы временного хода указанных величин в узле сетки;

$W_k(x_j)$ - главные компоненты временных коэффициентов разложения в 9 точках;

L_{hk} - коэффициенты двойного разложения по времени и горизонтальным координатам.

Для прогноза температуры внутри месяца использовалась схема множественной линейной регрессии:

$$Y = A'X, \tag{1.42}$$

где Y - вектор-предиктант, состоящий из коэффициентов разложения временного хода температуры в течение месяца;

X - вектор-предиктор, т.е. коэффициенты разложения временного хода, полученными с использованием (1.41),

A' - вектор-строка коэффициентов регрессии.

Проведен также ряд экспериментов, в которых прогностические значения средней месячной температуры и ее хода в течение месяца вычислялись не аналого-регрессионным методом, а методом осреднения наилучших аналогов. В некоторых случаях оценки прогнозов по второму методу оказались выше, однако в целом качество прогнозов, вычисленное с использованием первого метода множественной регрессии, оказалось лучше.

При анализе временных рядов могут быть использованы также другие методы, представленные в работах [80-82]. В работе [83] рассматриваются предикторы, составленные из триплетов пар значений среднемесячных температур и месячных сумм осадков. Для расчета динамики использованы фрактальные методы [107, 108].

Среди статистических методов выделяют также вероятностные методы [77]. При разработке прогноза прогнозист мысленно строит распределение вероятностей, даже если сам прогноз формально не является вероятностным. Так, при разработке прогноза осадков, который дается в двух категориях –

«есть осадки» и «без осадков», существует дискретное распределение вероятности этих двух событий. Это распределение содержит всего два элемента с одинаковой вероятностью осуществления. Задача прогнозиста выразить свою степень доверия одному из этих событий, то есть присвоить одному из событий вероятность осуществления равную 100 процентам, а другому событию вероятность 0 процентов.

Одним из способов введения вероятностной информации в прогноз непрерывных метеорологических параметров является применение в прогнозе доверительных интервалов. В этих прогнозах прогнозист указывает границы прогностического интервала метеорологического параметра и вероятность осуществления прогноза в этом интервале в соответствии с субъективным распределением вероятностей.

Преимуществом является использование небольшого количества информации и измерений, и возможность дальнейшего улучшения прогноза за счет снижения уровня неопределенности, что можно добиться посредством экспертных оценок группы специалистов, которые затем согласовываются между собой различными, качественными и количественными методами.

В работах [77, 84] представлен физико-статистический метод ГГО Юдина М.И., который имеет множество модификаций. В качестве предикторов метода и его модификаций выступают характеристики двух групп. К первой группе относятся характеристики состояния атмосферы: приземное давление, температура воздуха, геопотенциал *AT500*, количество осадков, облачность, число дней с формами циркуляции по Вангеймсу-Гирсу, индексы циркуляции атмосферы. Ко второй группе относятся характеристики внешних источников и стоков тепла: температуры воды в Северной Атлантике, теплосодержание верхнего 100-метрового слоя океана, ледовитость арктических морей, положение границы снежного покрова, индекс геомагнитной возмущенности. В настоящее время он применяется для прогноза средних месячных значений температуры и количества осадков. В методе все исходные данные подвергаются ортогонализации по уже представленной формуле (1.40), но применительно к исходным

метеорологическим характеристикам. Для прогноза используются лишь несколько первых коэффициентов разложения, описывающих значительную часть дисперсии предикторов и, вместе с тем, не содержащих их мелких, случайных колебаний. Рассчитывается ряд коэффициентов линейной корреляции между коэффициентами разложения полей предикторов и предиктантов по формуле (1.41), но применительно к иным исходным данным, и определяются наиболее значимые связи. На основании отбора наиболее значимых и независимых друг от друга предикторов составляются прогностические уравнения множественной регрессии по уже ранее представленной формуле (1.42), но применительно к новым характеристикам. В результате расчета по данным уравнениям формируются коэффициенты разложения будущих полей температуры и осадков. Модификацией метода является метод многофакторной регрессионной средней. Его преимущество в отличии от метода ГГО Юдина М.И. состоит в большой заблаговременности прогнозов (не меньше двух месяцев).

Среди технико-эксплуатационных характеристик БПЛА, влияющих на безопасность полета во время выпадения осадков, отдельного внимания заслуживает код IP, который может быть необходим при определении требований с учетом метеорологических ограничений маршрутной сети. Код IP обозначает степень защиты, обеспечиваемой оболочкой, от доступа к опасным частям, попадания внешних твердых предметов, воды, а также для предоставления дополнительной информации, связанной с такой защитой [109]. Он состоит из двух характеристических цифр, а также двух дополнительных букв при необходимости. Первая цифра кода обозначает защиту оборудования от проникновения твердых частиц. Вторая цифра кода обозначает защиту оборудования от вредного воздействия в результате проникновения воды. Первая дополнительная буква связана с защитой людей от доступа к опасным частям. Вторая дополнительная буква связана со вспомогательной информацией, относящейся к высоковольтным аппаратам, состоянию движения во время испытаний защиты от воды, состоянию неподвижности во время испытаний защиты от воды.

Таким образом, определены методы прогностической обработки метеорологической информации, которые могут быть использованы для восстановления работоспособности отдельных модулей АМИС при неблагоприятных условиях функционирования.

Выводы по Главе 1

Показана необходимость разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Показана практическая значимость и применение гетерогенных групп БПЛА для транспортировки грузов в России и за рубежом. Подтверждено, что применение гетерогенных групп БПЛА для решения задачи транспортировки грузов перспективно во многих отраслях, как в научно-исследовательских целях, так и коммерческих.

Проведен обзор и анализ существующих алгоритмов планирования и оптимизации транспортировки грузов, информации, методов и средств её формирования, актуализации и предоставления для использования, которые могут входить в состав алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Определены неблагоприятные условия функционирования АМИС, связанные с нарушением работоспособности отдельных элементов систем. Описана вычислительная обработка информации в АМИС, а также методы прогностической обработки метеорологической информации, которые могут быть использованы для восстановления работоспособности отдельных модулей АМИС.

Глава 2. Разработка информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

В текущей главе описывается разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Назначение разработанного информационного обеспечения заключается в поддержке принятия решений в части предоставлении эффективной по степени достоверности информации о рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Информация должна формироваться, храниться, предоставляться с использованием специальных методов и средств и упорядочена по структуре и формам представления. В качестве процесса, при управлении которым используют разработанное информационное обеспечение, выступает планирование и оптимизация транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА. Особенностью текущего информационного обеспечения являются методы и средства прогностической обработки метеорологической информации, поддерживающие принятие решение на стратегическом уровне управления при неблагоприятных условиях функционирования АМИП. Характеристикой качества решения информационного обеспечения является степень достоверности информации о рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. К условиям применения разработанного информационного обеспечения относится:

1) возможность нарушения измерительного канала наличия осадков снега и дождя в АМИП (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя осадков и датчика осадков);
2) возможность нарушения измерительного канала облачности в АМИП (в связи с нарушением датчика высоты нижней границы облаков);

3) возможность нарушения измерительного канала температуры в АМИП (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя и/или датчика температура и влажности воздуха);

Общие структурные схемы существующего и разработанного информационного обеспечения АМИП, представлены на Рис. Б.1 и Рис Б.2.

В Табл. 2.1 представлены структуры данных разработанного информационного обеспечения в виде баз данных (БД), содержащих информацию, предназначенную для использования.

Таблица 2.1 - Таблица БД в разработанном информационном обеспечении

Информация	**Структура данных, содержащая информацию**
Информация о гетерогенной группе БПЛА	БД БПЛА
Информация о миссиях	БД Миссии
Информация о грузах	БД Грузы
Метеорологическая информация для реконфигурации гетерогенной группы БПЛА при метеорологических ограничениях маршрутной сети	БД Реконфигурация

В Табл. 2.2 представлены формы информации в виде групп данных, содержащих информацию для представления в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Таблица 2.2 - Таблица групп данных в разработанном информационном обеспечении

Информация	**Группа данных, содержащая информацию**
Информация о системе управления БПЛА	Данные системы управления БПЛА
Информация о размещении объектов	Данные размещения объектов
Информация о перевозимых грузах	Данные перевозимых грузов
Информация об используемых БПЛА	Данные используемых БПЛА
Информация об эксплуатационно-технических данных БПЛА Информация об общих исходных данных БПЛА	Эксплуатационно-технические данные БПЛА Общие исходные данные БПЛА
Информация об экономических исходных данных БПЛА	Экономические исходные данные БПЛА
Информация о данных маршрутной сети	Данные маршрутной сети
Метеорологическая информация	Метеорологические данные

Информация может хранится не только в БД, но и в файлах, а также внутри кода программы.

Набор методов и средств формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации относится к следующим функциональным блокам:

1) ввод исходных данных;
2) вычислительное ядро;
3) верификация результатов расчетов, полученных с применением вычислительного ядра;
4) формирование лог-файла, полученного на основе верифицированных расчетов;
5) ядро визуализации и симуляции - средства визуализации и симуляции расчетов вычислительного ядра и дополнительной используемой информации;
6) вывод результатов/симуляция результатов расчетов вычислительного ядра и дополнительной используемой информации.

Общие логические модели для существующего и разработанного набора методов и средств формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации могут быть представлены следующим образом (см. Рис. Б.3, Рис. 2.1).

Рисунок 2.1. Общая логическая модель для набора методов и средств в разработанном информационном обеспечении

Рассмотрим далее подробно организацию данных разработанного информационного обеспечения вместе с предлагаемым набором методов и средств обработки этой информации. Более того, опишем масштабируемость разработанного информационного обеспечения, что определяет его гибкость и дает возможности для дальнейшего развития.

2.1. Организация данных информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

В текущем разделе определим упорядоченную по структуре и формам представления и предназначенную для использования информацию в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Организация данных зависит от назначения разработанного информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Должна формироваться, храниться, актуализироваться и предоставляться эффективная в части достоверности информация для использования в системе.

Можно определить характеристики групп данных, представленных в Табл. 2.2 (см. Табл. Б.1). Буквой «в» обозначены исходные данные, которые изначально даны, буквой «р» – полученные в ходе расчетов.

Данные могут быть трёх типов: внешними, внутренними и моделируемыми.

Внешние данные расположены в соответствующих БД. Определим, какие из характеристик групп данных, будут храниться в соответствующих БД, представленных в Табл. 2.1 (см. Табл. Б.2).

С учетом обзора и анализа существующего информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, проведенного в разделе 1.2, и Табл. Б.2, следует, что можно установить взаимосвязь между БД посредством следующей диаграммы (см. Рис. 2.2).

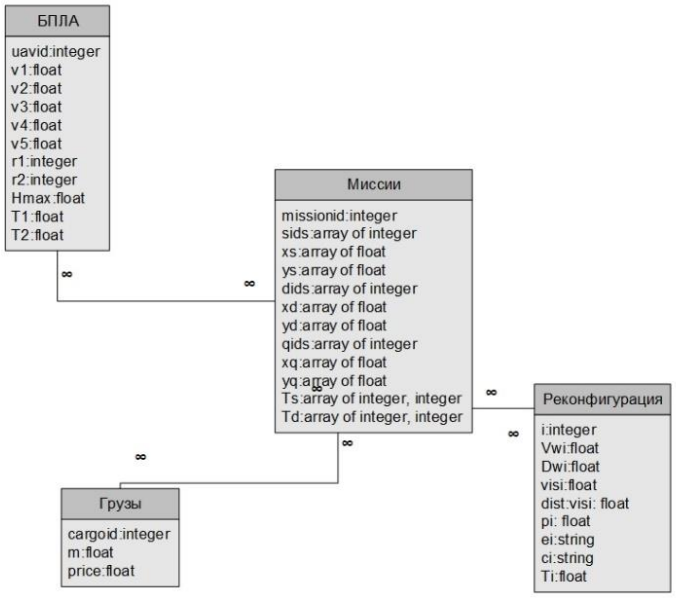


Рисунок 2.2. ER-диаграмма для организации БД разработанного информационного обеспечения

Внутренние данные встроены либо в саму программу, где они выражены через переменные, либо хранятся в файлах табличного или текстового формата, шейпфайлах, а также файлах графического формата, которые хранятся на устройстве. Внутренние данные представлены в Табл. 2.3.

Таблица 2.3 - Внутренние данные в разработанном информационном обеспечении

Встроенные в программу	**Файлы текстового формата**	**Шейпфайлы**	**Файлы графического формата**
Высота полета, заданное текущее время (дата), максимальный период планирования, путь лог-файла, пути изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности, частота обновления маршрутной сети	Лог-файл	Шейпфайл карты местности	Изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности

Моделируемые данные формируются в ходе расчетов в соответствующих функциональных блоках. К моделируемым данным относятся:

- моделируемые данные вычислительного ядра;
- время симуляции.

Таким образом, определена упорядоченная по структурам и формам информация для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Представлены внешние, внутренние и моделируемые данные, используемые в разработанном информационном обеспечении.

2.2. Методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

В текущем разделе описаны методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, относящиеся к функциональным блокам, представленным в начале Главы 2.

Ввод исходных данных. Данный функциональный блок отвечает за подготовку исходных данных, необходимых для работы разработанного информационного обеспечения. При этом, используемые данные должны согласовываться с упорядоченной по структуре и формам информацией, используемой в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов, представленной в разделе 2.1.

Для работы вычислительного ядра в части обработки метеоинформации необходимо задать статистическую метеорологическую информацию о параметрах ветра, температуре, облачности, наличии дождя и снега, видимости, давлении. Информация формируется из БД Реконфигурация.

Для работы вычислительного ядра в части расчета рационального сценария и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА также зададим:

- множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство характеризуется набором параметров, в который входит тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость, скорость взлета и скорость посадки, максимальная грузоподъёмность, стоимость летного часа, первая и вторая характеристическая цифра кода IP, предельно допустимая высота полета, минимально и максимально допустимая рабочая температура. Информация формируется из БД БПЛА;
- высота полета. Информация вводится пользователем;
- множество источников с координатами центров источников. Информация формируется из БД Миссия;
- множество стоков и координаты центров стоков. Информация формируется из БД Миссия;
- множество промежуточных пунктов и координаты центров промежуточных пунктов. Информация формируется из БД Миссия;
- множество грузов различных типов, где каждый тип груза характеризуется набором параметров, в которые входят сам тип груза, масса груза, стоимость груза. Информация формируется из БД Грузы;
- матрица, элементы которой задают величины запасов груза каждого типа в источниках. Информация формируется из БД Миссия;
- матрица, элементы которой задают величины потребностей в грузах каждого типа в стоках. Информация формируется из БД Миссия;
- распределение БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Информация формируется из БД БПЛА.

Выделяется отдельная память под промежуточные переменные, которые используются в расчетах вычислительного ядра или в других функциональных блоках.

Для верификации результатов расчетов запоминаются и сравниваются результаты расчетов вычислительного ядра.

Для формирования лог-файла определяют, какие из параметров, полученных в ходе расчетов вычислительного ядра, будут записаны и по какому пути в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Для ядра визуализации и симуляции задают пути изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности, а также шейпфайл карты местности, и производится чтение с файлов, задается условие остановки симуляции (связанное со временем работы симуляции и максимальный период планирования), определяется частота обновления маршрутной сети. Информация о путях расположения файлов, условии остановки симуляции и частоте обновления маршрутной сети хранится в коде программы.

Для вывода результатов/симуляции определяют условие запуска симуляции, место вывода результатов (предоставления информации) в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Логическая схема представления ввода исходных данных в информационном обеспечении отражена на Рис. 2.3.

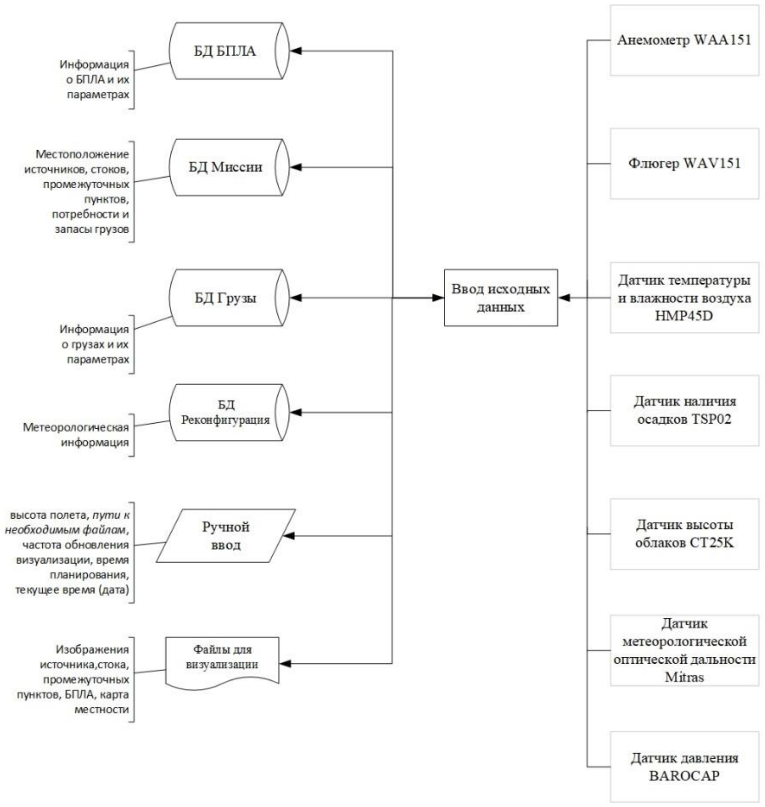


Рисунок 2.3. Логическая схема представления ввода исходных данных в информационном обеспечении

Вычислительное ядро. Вычислительное ядро в информационном обеспечении автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации учитывает следующие обработки информации: обработку метеорологической информации и обработку информации с целью расчета рационального сценария транспортировки грузов и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА.

Обработка метеоинформации в существующем информационном обеспечении АМИП происходит в соответствии с Рис. Б.1. Сигналы датчиков проходят через преобразователь, преобразовываясь в цифровой вид, поступая в соответствующие измерительные каналы. После расчетов по формулам (1.34) – (1.39) на выходе получают искомые метеопараметры с учетом осреднения.

Обработка метеоинформации в разработанном информационном обеспечении АМИП происходит в соответствии с Рис. Б.2. Обработка информации о параметрах ветра, видимости, давлении совпадает с

предложенными ранее для существующего информационного обеспечения АМИП. Изменяется обработка информации о наличии снега и дождя, облачности и температуре в части учета неблагоприятных условий функционирования АМИП, приведенных в начале Главы 2. Предполагается, что в случае нарушения работы преобразователей или датчиков работа измерительных каналов АМИП не прекращается, выходные метеопараметры прогнозируются с учетом метеоинформации, хранимой в БД Реконфигурация. Схематично это можно представить следующим образом (см. Рис. 2.4).

Рисунок 2.4. Детальная логическая схема представления обработки метеоинформации в разработанном информационном обеспечении

Существующая и предлагаемая обработка информации с целью расчета рационального сценария транспортировки грузов и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА состоит из обработки информации с целью формирования маршрутной сети с метеорологическими ограничениями, представленной (1.1), и непосредственно обработки информации с целью распределения транспортных средств по маршрутам, поиска рационального сценария транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА.

Маршрутная сеть в разработанном информационном обеспечении формируется согласно схеме, представленной на Рис. 2.5. В случае благоприятных условий обработка информации происходит по известной стандартной схеме, а в случае неблагоприятных условий задействуются спрогнозированные индикаторы дождя, снега, облачности и температуры.

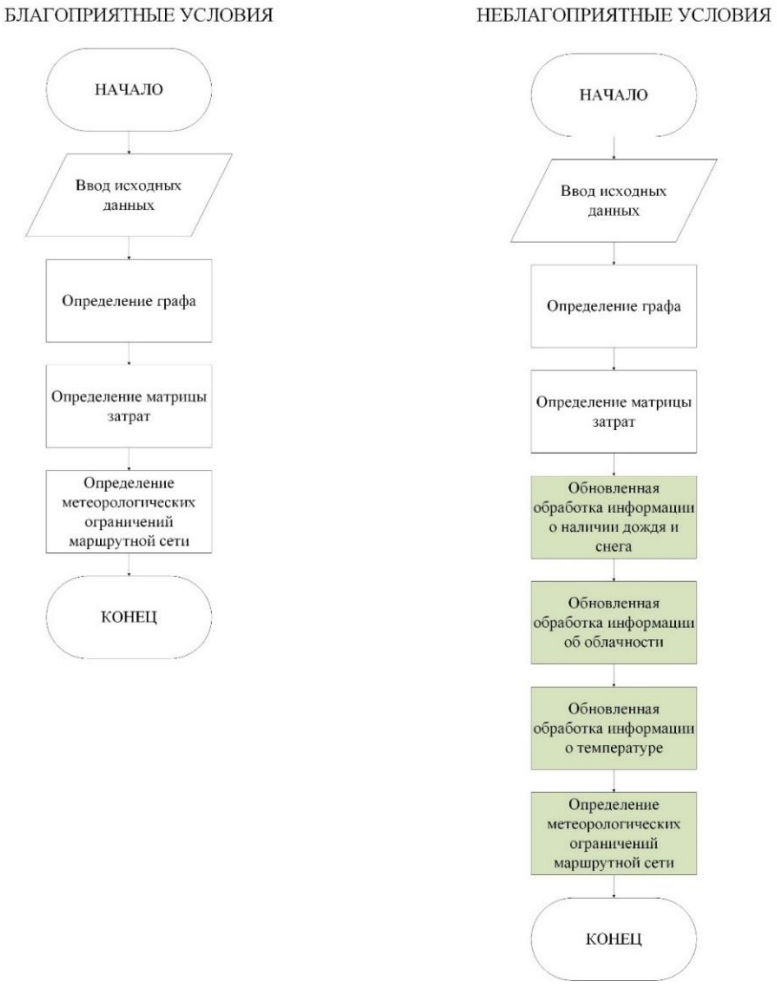


Рисунок 2.5. Общая логическая схема для построения маршрутной сети в разработанном информационном обеспечении

Поиск рационального сценария транспортировки грузов в существующем и разработанном информационном обеспечении производится в соответствии с Рис. 2.6.

Рисунок 2.6. Общая логическая схема при распределении БПЛА по маршрутам

Верификация результатов расчетов. После того, как в вычислительном ядре в системе были проведены расчёты, происходит верификация результатов расчётов. Она представляет собой процедуру проверки правильности выполнения расчётов с целью устранения возможных ошибок расчетов. Проведение верификации предполагает выполнение следующих проверок:

1. Проверка на надёжность - проверка ещё одного решения задачи оптимизации транспортных потоков с учётом того же критерия эффективности и прежнего набора полученных исходных данных.
2. Проверка на валидность. Основной полученный вывод – перераспределение маршрутов. Для проверки надёжности достаточно сравнить с предыдущем распределением транспортных средств. Для

проверки измеримости показателей достаточно обратиться к проверке значений задействованных для расчётов данных и рассмотрению наличия схожих значений данных в других логах. Проверка на непротиворечивость метода также обеспечивается за счёт проверки нынешних значений данных.

3. Проверка на генерализацию. В отличие от проверок в предыдущем пункте здесь исследуется вся совокупность параметров без разделения, то есть аналогично проверяется допустимость, измеримость и непротиворечивость, но уже не для каждого параметра, а для всего набора параметров.

Таким образом, если результаты расчетов не верифицированы, то необходимо повторное решение задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов или прерывание процесса. Если результаты расчетов верифицированы, то переходят к формированию лог-файла. Логическая схема представления верификации результатов расчетов вычислительного ядра в разработанном информационном обеспечении представлена на Рис. 2.7.

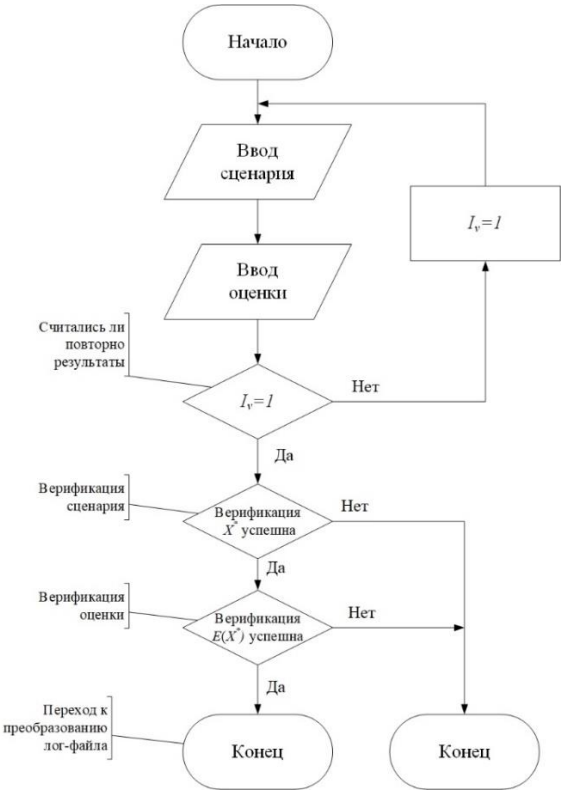


Рисунок 2.7. Логическая схема представления верификации в существующем и разработанном информационном обеспечении

Формирование лог-файла. В ходе выполнения задач происходит сбор информации и её сохранение в лог-файле. Лог-файл представляет собой файл текстового формата, в котором отмечены основные данные и результаты, полученные в ходе выполнения поставленных задач, а также основные изменения и действия в системе с указанием их времени.

Формирование лог-файла эффективно осуществлять именно после расчётов, поскольку это не препятствует проведению расчётов и информация является более полной. В качестве сохранённых данных рассчитывают и сохраняют следующие показатели для общего лог-файла:

- средняя скорость доставки грузов;
- средний показатель стоимостной оценки отсутствия простоев;
- рациональный сценарий транспортировки грузов.

Ядро визуализация и симуляции. Ядро визуализация и симуляции отвечает за визуализацию и симуляцию реализации найденного рационального сценария транспортировки грузов.

Данные визуализируются с использованием изображений. Изображения будут отображены на экране и могут перемещаться или изменяться в ходе симуляции. Среди визуализируемых данных можно отметить изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора наличия дождя, индикатора снега, индикатора облачности.

Стоит отметить, что не все исходные данные подлежат визуализации в виде изображений, однако они симулируются, так как учитываются в вычислительных расчётах. Так, например, скорость БПЛА влияет на частоту перемещения их изображений на симуляции, а топология маршрутной сети на расположение изображений объектов на симуляции и пути движения БПЛА.

Основное внимание в симуляции уделяется визуализации выполнения транспортной задачи. Симуляция может длиться до тех пор, пока выполняется заданное условие. В качестве условия может служить равенство текущего времени симуляции и максимального, заданного изначально в виде

времени планирования транспортировки грузов. Возможно появление ошибки в симуляции, тогда симуляция прервётся и остановится. Для возобновления симуляции надо будет осуществить перезапуск.

Логическая схема представления ядра визуализации/симуляции в существующем и разработанном информационно-алгоритмическом обеспечении представлена на Рис. 2.8.

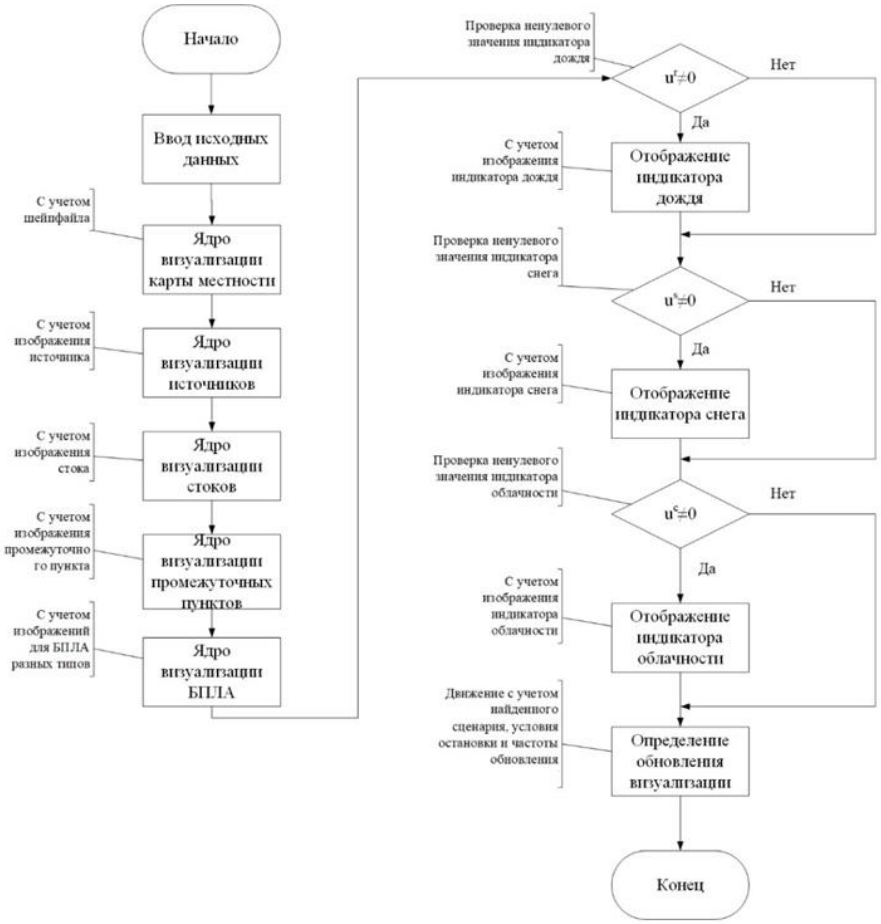


Рисунок 2.8. Схема представления ядра визуализации/симуляции в существующем и разработанном информационном обеспечении

Вывод результатов/симуляция. Вывод результатов/симуляция, как и сформированный лог-файл, обеспечивают предоставление информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

В качестве условий запуска симуляции служит взаимодействие пользователя с системой через интерфейс, а именно кнопку запуска симуляции. Пользователь обладает возможностью закончить симуляцию, если

он нажимает на соответствующую кнопку. Информация симуляции выводится на экран.

Таким образом, лог-файл и симуляция обеспечивают интерпретацию верифицированных результатов, полученных с использованием информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Пользователь может взаимодействовать с автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации посредством интерактивного интерфейса, а в случае его отсутствия открыть необходимый файл и найти информацию о найденном рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

2.3. Метод обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС

В текущем разделе описывается разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС. Данный метод может быть внедрен и в разработанное информационное обеспечение.

Назначение и характеристики метода. Назначение разработанного метода обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС заключается в формировании необходимых для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметров, включающих среднюю скорость и среднее направление ветра, среднюю температуру и температуру точки росы, индикаторы дождя и снега, высоту нижней границы облачности, видимость и дальность видимости, приведенное атмосферное давление.

Особенностью текущего метода является оперативная прогностическая обработка информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС.

К условиям применения разработанного метода обработки метеоинформации относится возможность наступления неблагоприятных условий функционирования АМИС в следствие чего присутствует:

1) возможность ограниченной информации о наличии осадков снега и дождя;
2) возможность ограниченной информации о высоте верхней границы облачности;
3) возможность ограниченной информации о температуре.

Используемая информация. Перечень массивов информации, используемых при реализации метода, представлен в Табл. Б.3.

Результаты решения. Перечень массивов информации, формируемых в результате реализации метода, представлен в Табл. Б.4.

Формализованная постановка задачи. Пусть заданы входные параметры, представленные в Табл. Б.3. Необходимо найти выходные параметры, представленные в Табл. Б.4, причем в случае неблагоприятных условий функционирования АМИС нужно провести обработку информации в оперативном режиме. Под оперативным нахождением решения понимается получение решения с минимальными временными затратами. Общие минимальные затраты определяются минимальными затратами на обработку и группировку информации каждой группы данных. Минимизация временных затрат при выборе используемых численных методов реализуется через сравнение их вычислительной сложности.

При благоприятных условиях обработка информации с целью определения расчетных показателей производится в соответствии с (1.34) - (1.39), представленными в разделе 1.3. Схематично можно представить следующим образом (см. Рис. Б.3).

При обозначенных неблагоприятных условиях обработка информации с целью определения расчетных показателей производится аналогично для параметров ветра, видимости, приведенного давления, однако изменяется

подход к определению остальных метеопараметров из Табл. Б.4 - происходит обработка информации для каждой группы данных: данных об явлениях, данных об облачности и данных о температуре с представлением итоговых результатов обработки (см. Рис. 2.9).

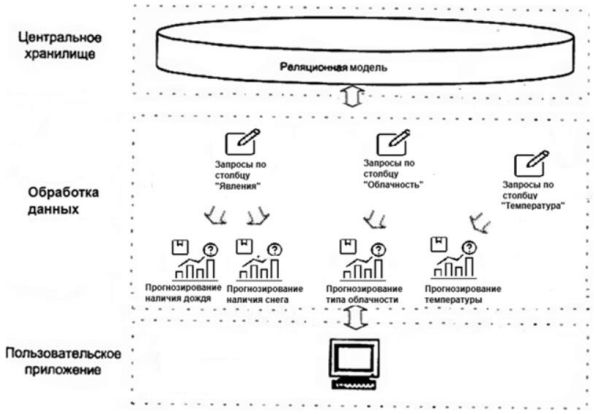


Рисунок 2.9. Логическая схема для предлагаемой обработки данных о явлениях, облачности и температуры в неблагоприятных условиях

Обработка данных о явлениях. Целью обработки информации о явлениях является представление итоговых результатов обработки в виде индикатора дождя и индикатора снега. Сначала опишем нахождение индикатора дождя u^r, потом нахождение индикатора снега u^s.

Для формирования индикатора дождя u^r необходимо произвести обработку информации о явлениях e_i в соответствующие моменты времени, заданные индексами i $(i = 1, \dots, n)$.

Обработка информации e_i с целью выделения значений r_i, определяющих наличие дождя, происходит с использованием операции реляционной алгебры – операции ограничения (выбора) отношения по некоторому условию, в соответствии с формулой:

$$r_i = I(\text{"дождь"} \in e_i) \qquad (2.1)$$

где $I(\text{"дождь"} \in e_i)$ – индикатор, принимающий значение 1 или 0, указывающий на наличие или отсутствие дождя в момент времени, задаваемый индексом i, определяемый по формуле:

$$I(\text{"дождь"} \in e_i) = \begin{cases} 1 \text{ при } \text{"дождь"} \in e_i \\ 0 \text{ при "дождь"} \notin e_i \end{cases}. \quad (2.2)$$

Значение u^r прогнозируется с помощью статистических методов прогнозирования.

Сгенерированный индикатор дождя u^r может быть определен по следующей формуле с использованием прогнозирования при среднем уровне ряда динамики:

$$u^r = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} r_i}{n}\right]. \quad (2.3)$$

Могут быть использованы другие методы прогнозирования при определении прогнозного индикатора дождя, например, прогнозирование с использованием среднего абсолютного прироста или прогнозирование с использованием среднего темпа роста.

Прогнозирование индикатора дождя с использованием среднего абсолютного прироста происходит в соответствии с формулой:

$$u^r = \left[r_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1}(r_{i+1} - r_i)}{n-1}\right]. \quad (2.4)$$

Прогнозирование индикатора дождя с использованием среднего темпа роста происходит в соответствии с формулой:

$$u^r = \left[[r_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_{i+1}}{r_i}}{n-1}\right]. \quad (2.5)$$

Доверительный интервал для прогнозного индикатора дождя определяется следующим образом:

$$(u^r - f_\alpha S_{u^r}; u^r + f_\alpha S_{u^r}), \quad (2.6)$$

где S_{u^r} – среднее квадратическое отклонение фактических данных о наличии дождя от расчетных, $S_{u^r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(r_i - u^r)}{n-2}}$;

f_α – табличное значение *t*-статистики Стьюдента с *n-2* степенями свободы и уровнем значимости α.

Однако, в связи с оперативностью предлагаемой обработки статистической информации о наличии дождя предлагается точечная оценка прогнозного индикатора дождя, то есть использование формул (2.3) - (2.5).

Рассмотренные предложенные методы прогнозирования считаются простейшими, обеспечивают краткосрочные приближенные прогнозы индикатора дождя в оперативном режиме.

Обработка информации e_i с целью выделения значений s_i, определяющих наличие снега, происходит с использованием операции реляционной алгебры – операции ограничения (выбора) отношения по некоторому условию, в соответствии с формулой:

$$s_i = I(\text{"снег"} \in e_i), \quad (2.7)$$

где $I(\text{"снег"} \in e_i)$ – индикатор, принимающий значение 1 или 0, указывающий на наличие или отсутствие снега в момент времени, задаваемый индексом *i*, определяемый по формуле:

$$I(\text{"снег"} \in e_i) = \begin{cases} 1 \text{ при } \text{"снег"} \in e_i \\ 0 \text{ при } \text{"снег"} \notin e_i \end{cases}. \quad (2.8)$$

Значение u^s прогнозируется с помощью статистических методов прогнозирования.

Сгенерированный индикатор дождя u^s может быть определен по следующей формуле с использованием прогнозирования при среднем уровне ряда динамики:

$$u^s = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} s_i}{n}\right]. \quad (2.9)$$

Прогнозирование индикатора снега с использованием среднего абсолютного прироста происходит в соответствии с формулой:

$$u^s = \left[s_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1}(s_{i+1} - s_i)}{n-1}\right]. \quad (2.10)$$

Прогнозирование индикатора снега с использованием среднего темпа роста происходит в соответствии с формулой:

$$u^s = \left[s_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{s_{i+1}}{s_i}}{n-1}\right]. \quad (2.11)$$

В связи с оперативностью предлагаемой обработки статистической информации о наличии снега предполагается точечная оценка прогнозного индикатора снега, то есть использование формул (2.9) - (2.11).

Обработка информации об облачности. Целью обработки информации об облачности является представление итогового результата обработки в виде индикатора облачности. Для формирования индикатора облачности u^c необходимо произвести обработку информации об облачности c_i в соответствующие дни, заданные индексами i $(i = 1, \dots, n)$.

Возможны 10 возможных вариантов обозначений типов облаков в столбце «Облачность» в соответствии с Табл. А.10.

Тип облаков l_i-перистый определяется следующей формулой:

$$l_i = 1 \text{ при } I("Ci" \in c_i) = 1, \quad (2.12)$$

где $I("Ci" \in c_i)$ – индикатор, принимающий значение 1 или 0, указывающий на наличие или отсутствие облачности типа “Ci” в момент времени, задаваемый индексом i.

По аналогии производятся расчеты для остальных типов облаков:

$$l_i = 2 \text{ при } I("Cs" \in c_i) = 1, \quad (2.13)$$

$$l_i = 3 \text{ при } I("Ac" \in c_i) = 1, \quad (2.14)$$

$$l_i = 4 \text{ при } I("As" \in c_i) = 1, \quad (2.15)$$

$$l_i = 5 \text{ при } I("Sc" \in c_i) = 1, \quad (2.16)$$

$$l_i = 6 \text{ при } I("St" \in c_i) = 1, \quad (2.17)$$

$$l_i = 7 \text{ при } I("Ns" \in c_i) = 1, \quad (2.18)$$

$$l_i = 8 \text{ при } I("Cu" \in c_i) = 1, \quad (2.19)$$

$$l_i = 9 \text{ при } I("Cb" \in c_i) = 1. \quad (2.20)$$

В случае, если тип облачности l_i не определен, то $l_i = 0$.

Значение u^{*c} прогнозируется с помощью статистических методов прогнозирования.

Сгенерированный тип облачности u^{*c} может быть определен по следующей формуле с использованием прогнозирования при среднем уровне ряда динамики:

$$u^{*c} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{n}\right]. \quad (2.21)$$

Прогнозирование типа облачности с использованием среднего абсолютного прироста происходит в соответствии с формулой:

$$u^{*c} = \left[l_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1}(l_{i+1} - l_i)}{n-1}\right]. \quad (2.22)$$

Прогнозирование типа облачности с использованием среднего темпа роста происходит в соответствии с формулой:

$$u^{*c} = \left[l_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_{i+1}}{l_i}}{n-1}\right]. \quad (2.23)$$

В связи с оперативностью предлагаемой обработки статистической информации о типе облачности предполагается точечная оценка прогнозного типа облачности с использованием формул (2.21) - (2.23).

Обработка информации о прогнозном типе облачности с целью нахождения индикатора облачности происходит в соответствии с Табл. А.10, где используется минимальная высота нижней границы облачности для соответствующего типа облака.

Обработка информации о температуре. Целью обработки информации о температуре является представление итогового результата обработки в виде индикатора температуры. Для формирования индикатора температуры u^T

необходимо произвести обработку информации о температуре T_i в соответствующие дни, связанные с индексами i $(i = 1, \dots, n)$.

Значение u^T прогнозируется с помощью статистических методов прогнозирования.

Сгенерированный индикатор температуры u^T может быть определен по следующей формуле с использованием прогнозирования при среднем уровне ряда динамики:

$$u^T = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n} \tag{2.24}$$

Прогнозирование с использованием среднего абсолютного прироста происходит в соответствии с формулой:

$$u^T = T_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1}(T_{i+1} - T_i)}{n-1} \tag{2.25}$$

Прогнозирование с использованием среднего темпа роста происходит в соответствии с формулой:

$$u^T = T_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{T_{i+1}}{T_i}}{n-1} \tag{2.26}$$

В связи с оперативностью предлагаемой обработки статистической информации о температуре предполагается точечная оценка прогнозного индикатора температуры, то есть использовать формулы (2.24) - (2.26).

Проиллюстрируем схематично логику разработанного метода обработки метеорологической информации в благоприятных и неблагоприятных условиях (см. Рис 2.10).

Рисунок 2.10. Логическая схема для разработанного метода обработки метеоинформации

Таким образом, разработан метод обработки метеорологической информации для АМИС, способный в оперативном режиме в неблагоприятных условиях функционирования АМИС формировать необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры: среднюю скорость и среднее направление ветра, среднюю температуру и температуру точки росы, индикаторы дождя и снега, высоту нижней границы облачности, видимость и дальность видимости, приведенное атмосферное давление.

2.4. Масштабируемость информационного обеспечения

В текущем разделе представим новые группы данных и модификации отдельных модулей разработанного информационного обеспечения, посредством учета которых можно расширить информационное обеспечение для применения в новых условиях.

Детальные логические схемы для разработанного и существующего информационного обеспечения в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП могут быть представлены следующим образом (см. Рис. Б.5, Рис. 2.11).

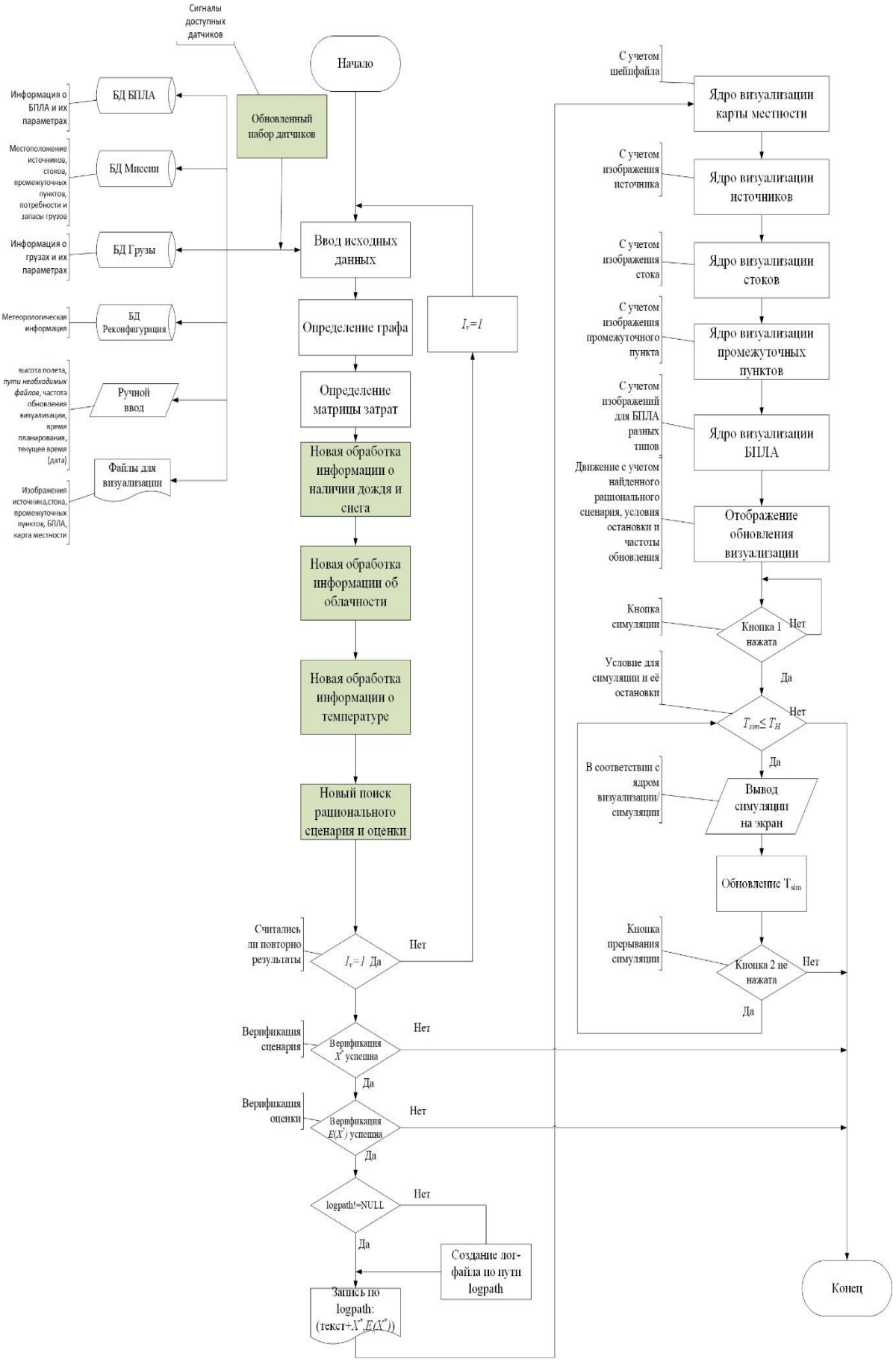


Рисунок 2.11. Логическая схема для разработанного информационного обеспечения в неблагоприятных условиях функционирования

Масштабируемость данных. Возможен учет динамической маршрутной сети, при которой симуляция будет отражать актуальную маршрутную сеть, а не только смоделированную и обновлять её характеристики. В таком случае возможные значения для характеристик могут иметь один из двух характеров: динамический (д) и статический (с) (см. Рис. 2.12). При статическом характере набор возможных значений совпадает с множеством допустимых значений. При динамическом набор возможных значений формируется из значений, составляющих наиболее вероятную (наиболее частую) область допустимых значений.

Статистические -Численность, дислокация и объем генерации груза (с) -Численность, дислокация, объём и периодичность получения грузов (с)	**Размещение на местности объектов, порождающих перемещение грузов** -Места расположения поставщиков и потребителей (с) -Места расположения перевозчиков (с) -Места производства, складирования грузов (с) -Места комплектования и реализации заказов (с) -Места расположения погрузочно-разгрузочных комплексов (с)	**Маршрутная сеть всех видов транспорта** -Геопространственные данные (с) -Протяжённость (с) -Коэффициент охвата (с) -Пропускная способность (с) -Организация движения транспортных средств (с)
Перевезённые грузы -Масса (с) -Габаритный размер (с) -Объём (с) -Форма (с) -Вид (с) -Требования к условиям транспортировки и хранения (с) -Требуемый способ погрузки/разгрузки (с)	**Используемые транспортные средства** -Технические характеристики: грузоподъемность, крейсерская и максимальная скорость, диапазон использования высот, практическая и техническая дальность полета и др. (с) -Технико-экономические характеристики: себестоимость производства, показатели топливной и экономической эффективности и др. (с)	**Физзико-географические, погодные и климатические условия** –Тип местности (с) –Рельеф местности(матрица высот) (с) –Температура воздуха (д) –Влажность воздуха (д) –Атмосферное давление (д) –Осадки (д) –Места возможного образования опасных явлений погоды (д)
Эксплуатационно-технические -Пропускная и провозная способности (с) -Регулярность и безопасность перевозок (с + д) -Скорость и сроки доставки грузов (с + д) -Уровень сохранности грузов (д) -Мобильность транспорта (с)	**Экономические** –Себестоимость перевозок (с) –Транспортная эффективность (с) –Экономическая эффективность (д) –Доходы, расходы, рентабельность, прибыль (с)	**Общие** –Объем перевозок грузов (с) –Грузооборот (с) –Дальность перевозки груза(с) –Скорость доставки (с) –Время реакции БПЛА (с) –Структура парка транспортных средств (с)

Рисунок 2.12. Набор данных для расширения разработанного информационного обеспечения

Методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации,

представленные в разделе 2.2, могут быть модифицированы с учетом использования новой информации.

Масштабируемость ввода исходных данных. Масштабируемость ввода исходных данных предполагает модификации ввода исходных данных посредством нового ввода данных, изменения типа ввода данных и др.

Могут измениться задачи моделирования, что повлияет на ввод исходных данных. Например, может быть решена задача отображения характеристик выделенного на симуляции БПЛА (см. Рис. Б.6, Рис. Б.7).

В зависимости от типов и форматов данных, а также поставленных задач моделирования можно предложить следующие модификации для ввода исходных данных (см. Табл. 2.4).

Таблица 2.4 - Перечень модификаций для ввода исходных данных в разработанном информационном обеспечении

Модификации	**Краткое описание**
Модификации для внешних данных	Чтение из новой БД, изменения показателей в имеющихся БД, удаление БД или исключение из рассмотрения
Модификации для внутренних данных	Чтение из нового табличного/текстового/графического файла, изменения показателей в имеющихся табличных/текстовых/графических файлах, удаление табличного/текстового/графического файла или исключение из рассмотрения, создание новых переменных и выделение памяти для них, изменение значений существующих переменных, исключение из рассмотрения существующих переменных, добавление новых переменных с ненулевым значением
Модификации для моделируемых данных	Изменение значения существующей переменной, исключение из рассмотрения существующей переменной
Модификации для новых форматов файлов	Учет не задействованных на текущий момент форматов файлов (например, аудио- и видеофайлов)
Модификация задач моделирования	Исключение типа задачи (статического или динамического), исключение задачи, добавление задачи, для решения которой хватает набора исходных данных (например, отображение характеристик выделенного на симуляции БПЛА (см. пример на Рис. 2.20, 2.21)

Масштабируемость вычислительного ядра. Масштабируемость вычислительного ядра предполагает модификации обработки метеоинформации, обработки информации для построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями и поиска рационального сценария транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. С учетом изложенного ранее в разделе 2.2 описания вычислительного ядра предлагаются следующие группы модификаций для вычислительного ядра (см. Табл. 2.5).

Таблица 2.5 - Перечень модификаций для вычислительного ядра в разработанном информационном обеспечении

Группа модификаций	**Краткое описание**
Модификации обработки метеоинформации	Использование иных методов и средств обработки метеоинформации, в том числе выбор различных методов прогностической обработки метеоинформации
Модификации построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями	Новые подходы к обработке информации с целью формированию графов и определению матрицы затрат, изменение обработки информации с целью определения метеорологических ограничений маршрутной сети
Модификации поиска рационального сценария транспортировки грузов и стоимостной оценки отсутствиях всех простоев БПЛА	Изменение обработки информации из-за различных методов поиска рационального распределения БПЛА по маршрутам, подходов к реконфигурации гетерогенной группы БПЛА при метеорологических ограничениях маршрутной сети

Масштабируемость верификации результатов расчетов. Масштабируемость верификации результатов расчетов предполагает модификации верификации результатов расчетов за счет их сокращения.

С учётом того, что верификация может быть проведена за счёт проверки надёжности, валидности и генерализации, является возможным ускорение процесса верификации за счёт частичной верификации. Полное отсутствие верификации так же возможно, однако это значительно повышает риски в случае ошибки работы системы. Таким образом, можно предложить следующие модификации для верификации результатов расчетов (см. Табл. 2.6).

Таблица 2.6 - Перечень модификаций для верификации результатов расчетов в разработанном информационном обеспечении

Модификации	Краткое описание
Модификации комбинации проверок	Проверка надежности, валидности и генерализации сводится до проверки одного типа или проверок двух типов
Модификации полноты верификации	Производится не полная верификация результатов (например, происходит верификация найденного сценария транспортировки грузов, но не стоимостной оценки простоев БПЛА)

Масштабируемость формирования лог-файла. Масштабируемость формирования лог-файла предполагает модификации формирования лог-файла посредством формирования новых лог-файлов или изменения данных в текущем лог-файле, а также возможного изменения самого типа лог-файла.

Изменения в лог-файле могут быть сделаны с использованием уже предложенных к интеграции модификаций (см. Табл. 2.4) , так как может быть изменен как сам путь к файлу, то есть возможна смена итогового файла или итоговых файлов логов, так и значения в самих логах за счёт модификаций, предложенных к внедрению на вычислительном этапе. Возможные типы лог-файлов вместе с примерами содержащихся данных представлены в Табл. 2.7.

Таблица 2.7 - Типы лог файлов вместе с примерами содержащихся данных для модификации в разработанном информационном обеспечении

Общий лог-файл	Лог-файл БПЛА	Лог-файл миссии
Суммарный грузооборот, время окончания транспортных операций, среднее время выполнения миссий, средняя стоимость выполненных миссий, средние затраты, количество выполненных миссий	Заряд батареи, грузооборот, пройденное расстояние, количество перевезённых грузов, текущая скорость, текущие координаты, текущие координаты целевой точки, наличие груза на борту (если груз имеется, указывается информация по нему)	Длительность выполнения миссии, стоимость выполнения миссии, информация о перевозимом грузе, информация об участвующих в транспортировке БПЛА

Также может быть изменён формат файла и применены модули, аналогичные предложенным на этапе ввода исходных данных. Таким образом,

можно предложить следующие модификации для формирования лог-файла (см. Табл. 2.8).

Таблица 2.8 - Перечень модификаций для формирования лог-файла в разработанном информационном обеспечении

Модификации	**Краткое описание**
Модификации для данных лог-файла	Вывод новых данных в лог-файл (в том числе вместо существующих данных лог-файла)
Модификации для форматов лог-файла	Изменение формата лог-файла, например, с .txt на .json
Новые лог-файлы	Формирование новых лог-файлов (см. примеры в Табл. 2.7)

Масштабируемость ядра визуализации/симуляции. Масштабируемость ядра визуализации/симуляции предполагает модификации отображения объектов визуализации/симуляции. Масштабируемость вывода данных/симуляции полностью зависит от модификации вывода данных/симуляции в связи с модификацией ядра визуализации/симуляции.

С одной стороны, возможна визуализация и симуляция новых данных, причем не только в виде изображений. Возможен тип визуализации – график, который используется в тех случаях, если параметр или группа параметров принимают численные значения, которые меняются со временем.

В Табл. 2.9 представлены примеры возможных новых визуализаций/симуляций данных вместе с типом отображения.

Таблица 2.9 - Примеры возможных новых визуализаций/симуляций для модификации в разработанном информационном обеспечении

Данные	**Тип визуализации**
Характеристики информационных и управляющих потоков	График (например, количество невыполненных миссий от времени симуляции)
Места комплектования и реализации заказов	Изображение
БПЛА	Изображение
Груз	Изображение
Степень опасности	Изображение
Грузооборот	График
Среднее время доставки	График
Средняя дальность перевозки груза	График
Доходы	График
Расходы	График

Помимо анимации изображений данные могут быть выведены в текстовом виде в консоль программы (см. Рис. Б.7) или в специальный файл (не в виде лог-файла, а в виде временного вспомогательного файла), а также в табличном виде в БД. Возможно и изменение условия остановки симуляции, частоты обновления симуляции, изменение визуализации по аналогии с возможными модификациями для формирования лог-файла.

Более того, возможна интерактивность визуализации/симуляции с пользователем. Например, выделение БПЛА посредством клика мыши (см. Рис. Б.6) или взаимодействие с меню (см. Рис. Б.8). Представленное на Рис. Б.8 меню может также служить для вывода актуальных данных.

Можно предложить следующие модификации для ядра визуализации/симуляции (см. Табл. 2.10).

Таблица 2.10 - Перечень модификаций для ядра визуализации/симуляции в разработанном информационном обеспечении

Модификации	**Краткое описание**
Модификации файлов изображений	Изменение файлов изображений для существующих визуализаций
Модификации параметров визуализации	Изменение параметров визуализации для изображений: цвет, размер, контур, цвет контура, местоположение, интерактивность
Модификации отображения	Включение или отключение отображения конкретного параметра или группы параметров
Модификации ракурса изображений Модификации для новых данных	Изменение масштаба изображения и изменение угла, под которым можно смотреть визуализацию Добавление нового графика, добавление новых изображений (см. примеры в Табл. 2.13)
Модификации для способа вывода данных	Определение вывода данных в иных форматах помимо графического
Модификации условия остановки	Изменение условия остановки (например, не спустя период планирования, а спустя пол периода)
Модификация частоты обновления симуляции	Изменение скорости симуляции (например, ускорение или замедление в заданное ЛПР число раз)

Приведенные возможности масштабирования данных, их ввода, вычислительной и поствычислительной обработки определяют гибкость

разработанного информационного обеспечения и дают возможности для дальнейшего развития.

Выводы по Главе 2

Разработано информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, отличающееся от существующих методами и средствами прогностической обработки метеорологической информации, поддерживающими принятие решение на стратегическом уровне управления при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, и предоставляющее эффективную в части достоверности информацию о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Определена упорядоченная по структурам и формам информация для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Представлены внешние данные, выраженные в виде БД с определенными для них взаимосвязями. Предложены внутренние и моделируемые данные, используемые в разработанном информационном обеспечении автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Определены методы и средства формирования, хранения, актуализации и предоставления предложенной информации с использованием функциональных блоков. Представлен ввод исходных данных, в том числе необходимый для работы вычислительного ядра, отвечающего за обработку метеоинформации и обработку информации с целью формирования маршрутной сети с метеорологическими ограничениями и поиска рационального сценария транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки простоев всех БПЛА. Предложено вычислительное ядро автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении

группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, работающее в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП. Представлена верификация результатов расчетов вычислительного ядра. Описано формирование лог-файла, содержащего информацию о характеристиках выполняемой транспортировки грузов. Определено ядро визуализации и симуляции данных в разработанном информационном обеспечении автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, а также описан вывод результатов и симуляция в системе.

Разработан метод обработки метеорологической информации для АМИС, отличающийся от существующих оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС и формирующий необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры. Определена обработка метеоинформации с целью поиска индикатора дождя, индикатора снега, индикатора температуры и индикатора облачности при неблагоприятных условиях.

Описана масштабируемость разработанного информационного обеспечения. Представлены новые группы данных, посредством учета которых можно расширить информационное обеспечение для применения в новых условиях. Предложены модификации отдельных модулей разработанного информационного обеспечения, определяющих его структуру.

Результаты данной Главы опубликованы в работах [110-122].

Глава 3. Разработка алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации

В текущей главе описывается разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Назначение разработанного алгоритмического обеспечения заключается в поддержке принятия решений в части формирования рационального сценария транспортировки грузов, обеспечивающего наибольшее значение показателя стоимостной оценку отсутствия простоев.

В качестве процесса, при управлении которым используют разработанное алгоритмическое обеспечение, выступает планирование и оптимизация транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА. Обзор и анализ существующего алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации был проведен в разделе 1.2. Особенностью текущего алгоритмического обеспечения является его работоспособность в неблагоприятных условиях функционирования АМИП. Характеристикой качества решения алгоритмического обеспечения является показатель стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

К условиям применения разработанного алгоритмического обеспечения относятся:

1) возможность нарушения измерительного канала наличия осадков снега и дождя в АМИП (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя осадков и датчика осадков);
2) возможность нарушения измерительного канала облачности в АМИП (в связи с нарушением датчика высоты нижней границы облаков);

3) возможность нарушения измерительного канала температуры в АМИП (в связи с нарушением функционирования измерительного преобразователя и/или датчика температура и влажности воздуха);
4) значения метеорологических параметров для остальных измерительных каналов в АМИП не влияют на реконфигурацию гетерогенной группы БПЛА при сформированных метеорологических ограничениях маршрутной сети и не учитываются в алгоритмическом обеспечении.

Разработанное алгоритмическое обеспечение включает в себя следующие алгоритмы:

1) алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП (с учетом разработанного метода обработки информации в разделе 2.3);
2) алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам.

Поиск плана транспортировки грузов и выбор транспортных средств с заданными характеристиками производится неразделимо в алгоритме №2.

Формализованная постановка задачи. Входные данные разработанного алгоритмического обеспечения следующие:

– множество W^* – метеорологическая информация, содержащая $i = (1, \dots, n)$ значений индексов, относящихся к каждому моменту времени из рассматриваемого временного промежутка в n значений; e_i $(i = 1, \dots, n)$ – информацию о наличии метеорологических явлений, в том числе дожде и снеге в момент времени, соответствующий индексу i; c_i $(i = 1, \dots, n)$ - информацию об облачности, в том числе о типе облачности, в момент времени, соответствующий индексу i; $T_i (i = 1, \dots, n)$ - числовые показатели температуры в момент времени, соответствующий индексу i; u^{*r}, u^{*s}, u^{*c}, u^{*T} – индикаторы дождя, снега, облачности и температуры, полученные с измерительных каналов в случае благоприятных условий функционирования АМИП;

– множество $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{n^*}\}$ – множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство A_l характеризуется набором параметров $A_{P\,l}$, в которые входят тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость v_{i1}, скорость взлета v_{i2} и скорость посадки v_{i3}, максимальная грузоподъёмность v_{i4}, стоимость летного часа v_{i5}, первая характеристическая цифра кода IP r_{i1}, вторая характеристическая цифра кода IP r_{i2}, предельно допустимая высота полета H_i^{max}, минимально допустимая рабочая температура T_{i1}, максимально допустимая рабочая температура T_{i2}.

– высота полета H;

– множество источников $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{k_1}\}$;

– множество стоков $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{k_2}\}$;

– множество промежуточных пунктов $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{k_3}\}$;

– характеристики источников SP_i: координаты центров x_{si}, y_{si};

– характеристики стоков DP_i: координаты центров x_{di}, y_{di};

– характеристики промежуточных пунктов QP_i: координаты центров x_{qi}, y_{qi};

– множество грузов различных типов G. Каждый тип груза G_k характеризуется набором параметров GP_k, в которые входят сам тип груза g_{k1}, масса груза g_{k2}, стоимость груза g_{k3}. Считается, что приоритетности у грузов равны.

– матрица $T^S = \|T(S_i, G_k)\|$, элементы которой задают величины запасов груза k-го типа в источнике S_i.;

– матрица $T^D = \|T(D_j, G_k)\|$, элементы которой задают величины потребностей в грузе k-го типа в стоке D_j;

– $Z = \|V(S_i \cup D_j \cup Q_r, A_l)\|$ – матрица распределений БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Элементы матрицы задают количество единиц БПЛА l-го типа, находящихся в текущий момент в каждом из перечисленных пунктов.

Зададим R^* – маршрутную сеть, определенную на основе исходных данных и заданную следующим набором параметров:

$$R^* = \langle S, D, Q, \Gamma, C, U^* \rangle, \tag{3.1}$$

где $\Gamma = \{ \Gamma_f \}$ – карта (граф) маршрутов с привязкой к координатам;

$C = \|C_f(A_l, Y_p)\|$ –матрица, задающая затраты ресурсов из множества $Y = \{Y_p\}$ при использовании транспортного средства A_l на маршруте Γ_f;

$U^* = \|U^*(A_l, \Gamma_f)\|$ – матрица метеорологических ограничений маршрутной сети.

Задача планирования и оптимизации транспортировки грузов задаётся решением задачи оптимизации:

$$E(X, R^*, T^S, T^D, Z) \to \max, X \in X_F, \tag{3.2}$$

где E –эффективность сценариев - показатель стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА при наименьшей продолжительности доставки грузов. Обозначим X^* найденный сценарий транспортировки грузов в задаче (3.2).

Общая логическая схема существующего и разработанного автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации может быть представлена следующим образом (см. Рис. Б.9, Рис. Б.10).

Рассмотрим далее подробно алгоритмы, входящие в состав разработанного алгоритмического обеспечения. Более того, опишем масштабируемость разработанного алгоритмического обеспечения, что определяет его гибкость и дает возможности для дальнейшего развития.

3.1. Алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями

В текущей главе описан алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями, входящий в состав разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Назначение разработанного алгоритма построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями заключается в формировании графа маршрутов с привязкой к координатам, определении матрицы, определяющей затраты временных ресурсов при использовании транспортных средств на маршрутах, а также определении метеорологических ограничений маршрутной сети в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП.

В качестве процесса, при управлении которым используют разработанный алгоритм, выступает формирование маршрутной сети, определяемой (3.1). Особенностью текущего алгоритма является формирование метеорологических ограничений маршрутной сети, связанных с влиянием дождя, снега, облачностью и температурой, в неблагоприятных условиях функционирования АМИП. При этом в случае неблагоприятных условий алгоритм обладает оперативностью, выраженной в формировании метеорологических ограничений с минимальными временными затратами.

Общая логическая схема построения маршрутной сети в общем виде уже была представлена ранее на Рис. 2.5.

Ввод исходных данных. Исходные данные разработанного алгоритма построения маршрутной сети:

– множество W^* – метеорологическая информация, содержащая $i = (1, \dots, n)$ значений индексов, относящихся к каждому моменту времени из рассматриваемого временного промежутка в n значений; e_i $(i = 1, \dots, n)$ – информацию о наличии метеорологических явлений, в том числе дожде и снеге в момент времени, соответствующий индексу i;

$c_i\ (i = 1, \dots, n)$ - информацию об облачности, в том числе о типе облачности, в момент времени, соответствующий индексу i; $T_i (i = 1, \dots, n)$ - числовые показатели температуры в момент времени, соответствующий индексу i; u^{*r}, u^{*s}, u^{*c}, u^{*T} – индикаторы дождя, снега, облачности и температуры, полученные с измерительных каналов в случае благоприятных условий функционирования АМИП;

- множество $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{n^*}\}$ – множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство A_l характеризуется набором параметров A_{Pl}, в которые входят тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость v_{i1}, скорость взлета v_{i2} и скорость посадки v_{i3}, максимальная грузоподъёмность v_{i4}, стоимость летного часа v_{i5}, первая характеристическая цифра кода IP r_{i1}, вторая характеристическая цифра кода IP r_{i2}, предельно допустимая высота полета H_i^{max}, минимально допустимая рабочая температура T_{i1}, максимально допустимая рабочая температура T_{i2}.
- высота полета H;
- множество источников $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{k_1}\}$;
- множество стоков $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{k_2}\}$;
- множество промежуточных пунктов $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{k_3}\}$;
- характеристики источников SP_i: координаты центров x_{si}, y_{si};
- характеристики стоков DP_i: координаты центров x_{di}, y_{di};
- характеристики промежуточных пунктов QP_i: координаты центров x_{qi}, y_{qi};
- множество грузов различных типов G. Каждый тип груза G_k характеризуется набором параметров GP_k, в которые входят сам тип груза g_{k1}, масса груза g_{k2}, стоимость груза g_{k3}. Считается, что приоритетности у грузов равны.
- матрица $T^S = \|T(S_i, G_k)\|$, элементы которой задают величины запасов груза k-го типа в источнике S_i.;

– матрица $T^D = \|T(D_j, G_k)\|$, элементы которой задают величины потребностей в грузе k-го типа в стоке D_j;

– $Z = \|V(S_i \cup D_j \cup Q_r, A_l)\|$ – распределение БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Элементы матрицы задают количество единиц БПЛА l-го типа, находящихся в текущий момент в каждом из перечисленных пунктов.

Определение графа. В разработанном алгоритме построения маршрутной сети считается, что БПЛА осуществляют вертикальный взлёт и посадку с учетом заданной высоты H. В качестве вершин графа рассматриваются стоки, источники и промежуточные пункты. В качестве ребер графа используются маршруты, соединяющие вершины графа. Используется алгоритм Флойда-Уоршелла [83-85], поскольку его особенности применения, изложенные в Табл. А.2., подходят под условия решения задачи.

Определение матрицы затрат. В качестве матрицы затрат рассматривается $C = \|C_f(A_l, Y_p)\|$ – матрица затрат, задающая затраты временных ресурсов при использовании транспортных средств A_l на маршрутах Γ_f. Эти затраты определяются с учетом скоростных характеристик БПЛА - максимальной крейсерской скорости v_{l1}, скорости взлета v_{l2} и скорости посадки v_{l3}, и длиной маршрута Γ_f, представленного расстоянием между его двумя точками с учетом взлета и посадки БПЛА при высоте H.

Определение метеорологических ограничений маршрутной сети. Определение метеорологических ограничений маршрутной сети U^* происходит в несколько шагов в соответствии с Рис. Б.11.

Определение индикаторов. Для определения индикатора дождя u^r, индикатора снега u^s, индикатора облачности u^c, индикатора температуры u^T воспользуемся алгоритмом, учитывающим предложенный метод обработки информации, представленный в разделе 2.3.

Формирование каждого индикатора происходит независимо от других, опираясь на обработку информации для каждой исходных группы данных (см. Рис. 3.1).

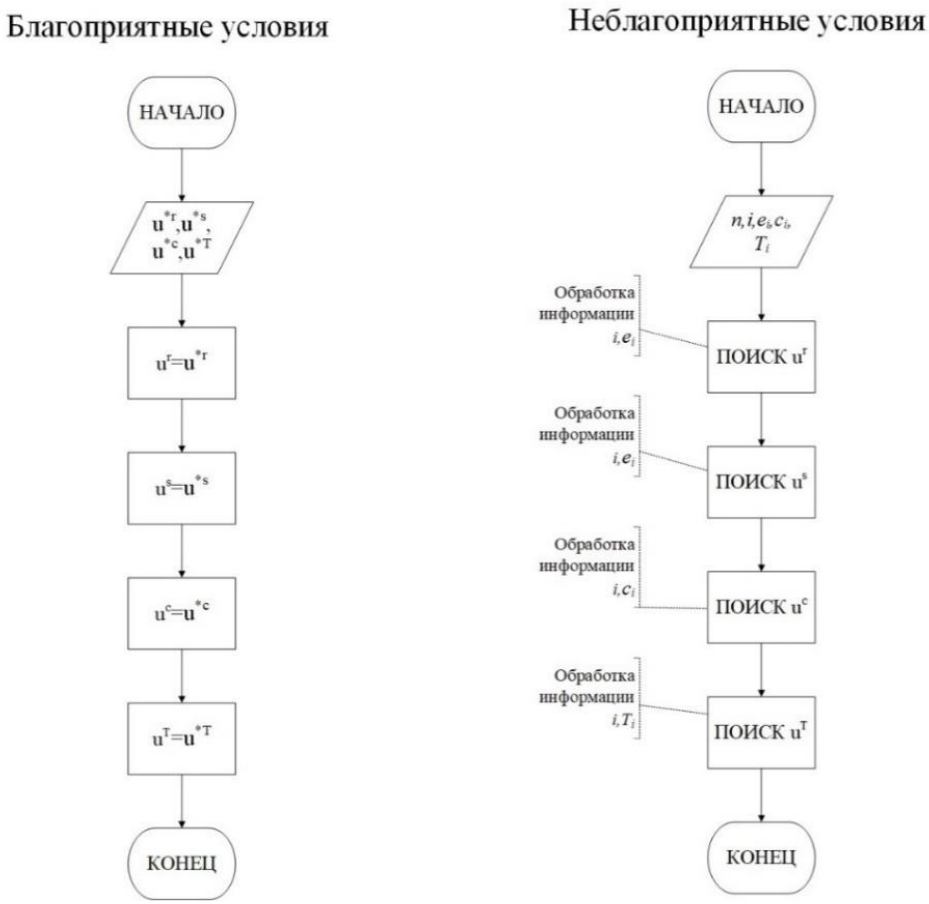


Рисунок 3.1. Общая схема алгоритма определения индикаторов

Поиск u^r в неблагоприятных условиях. Обрабатывается информация e_i с целью выделения значений r_i, определяющих наличие дождя, в соответствии с формулой (2.1).

Значение u^r прогнозируется с помощью статистического метода прогнозирования при среднем уровне ряда динамики по формуле (2.3).

Схема алгоритма, определяющего индикатор дождя, представлена на Рис. 3.2.

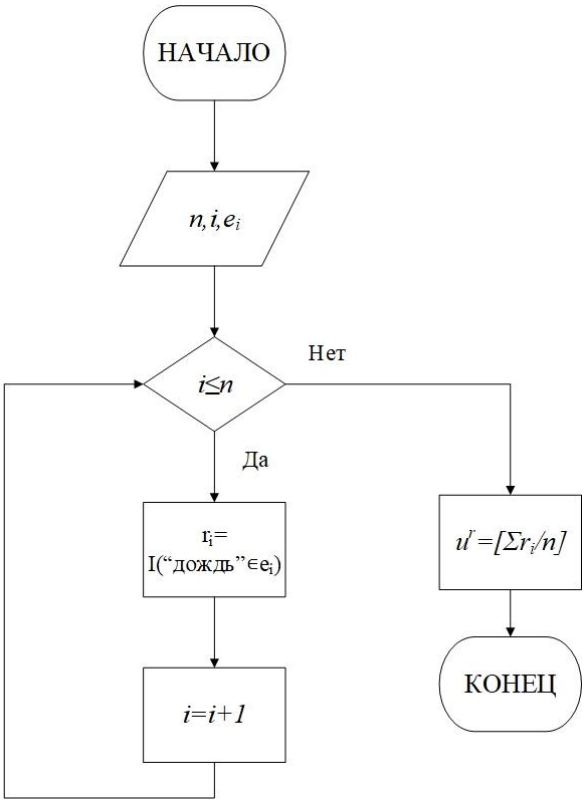


Рисунок 3.2. Схема алгоритма определения индикатора дождя в неблагоприятных условиях

Поиск u^s в неблагоприятных условиях. Обрабатывается информация e_i с целью выделения значений s_i , определяющих наличие снега, в соответствии с формулой (2.7).

Значение u^s прогнозируется с помощью статистического метода прогнозирования при среднем уровне ряда динамики по формуле (2.9).

Схема алгоритма, определяющего индикатор снега, представлена на Рис. 3.3.

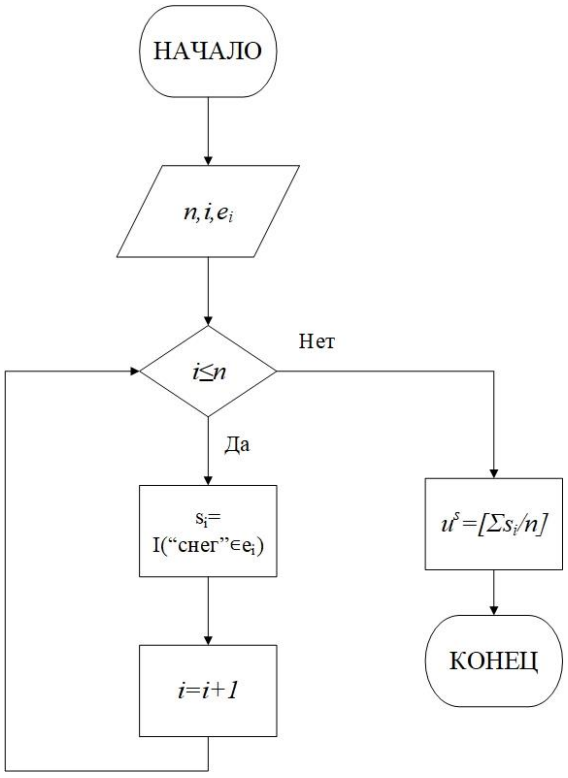


Рисунок 3.3. Схема алгоритма определения индикатора снега в неблагоприятных условиях

Поиск u^c в неблагоприятных условиях. Обрабатывается информация c_i с целью выделения значений l_i , определяющих ненулевой тип облачности, в соответствии с формулами (2.12) – (2.20). В случае, если тип облачности l_i не определен, то $l_i = 0$.

Значение u^c формируется в соответствии с прогнозируемым типом облачности с помощью статистического метода прогнозирования при среднем уровне ряда динамики по формуле (2.21) и Табл. А.10, откуда учитывается минимальное значения высоты нижней границы облачности для этого типа облачности.

Схема алгоритма, определяющего индикатор облачности, представлена на Рис. 3.4.

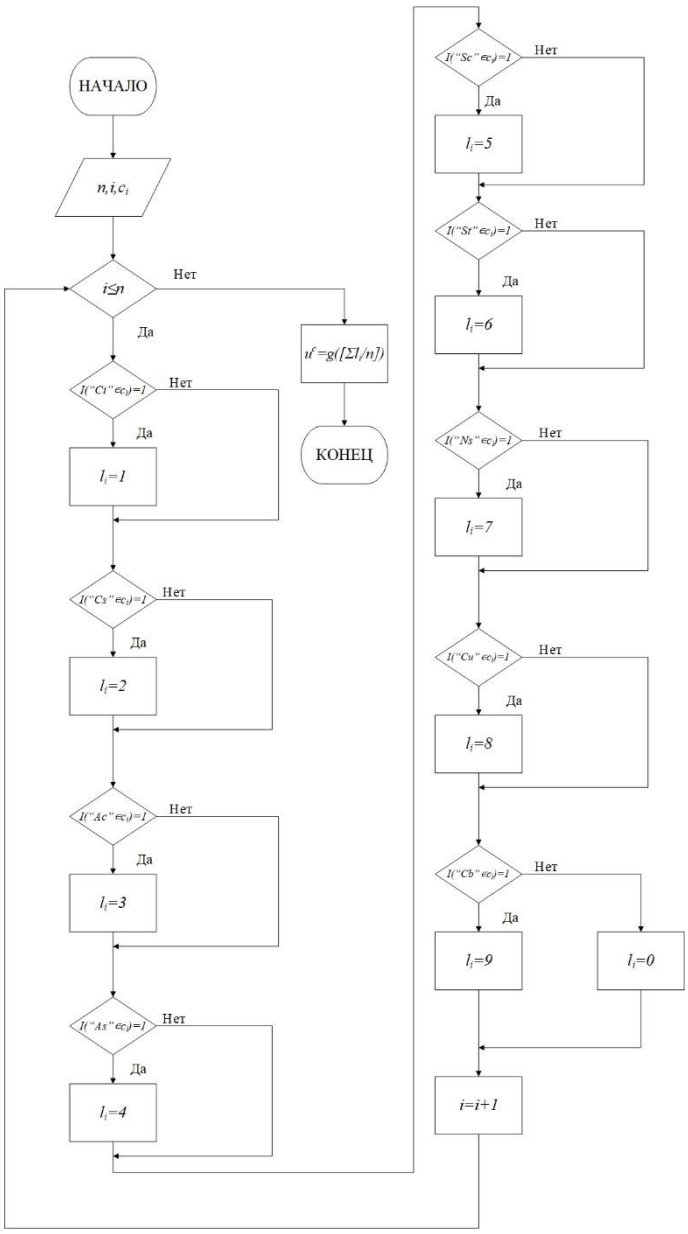


Рисунок 3.4. Схема алгоритма определения индикатора облачности в неблагоприятных условиях

Поиск u^T *в неблагоприятных условиях.* Значение u^T прогнозируется с помощью статистического метода прогнозирования при среднем уровне абсолютного прироста по формуле (2.25) и не требует предварительной дополнительной обработки.

Таким образом, алгоритм определения индикаторов в случае неблагоприятных условий может быть представлен детальнее (см. Рис. 3.5).

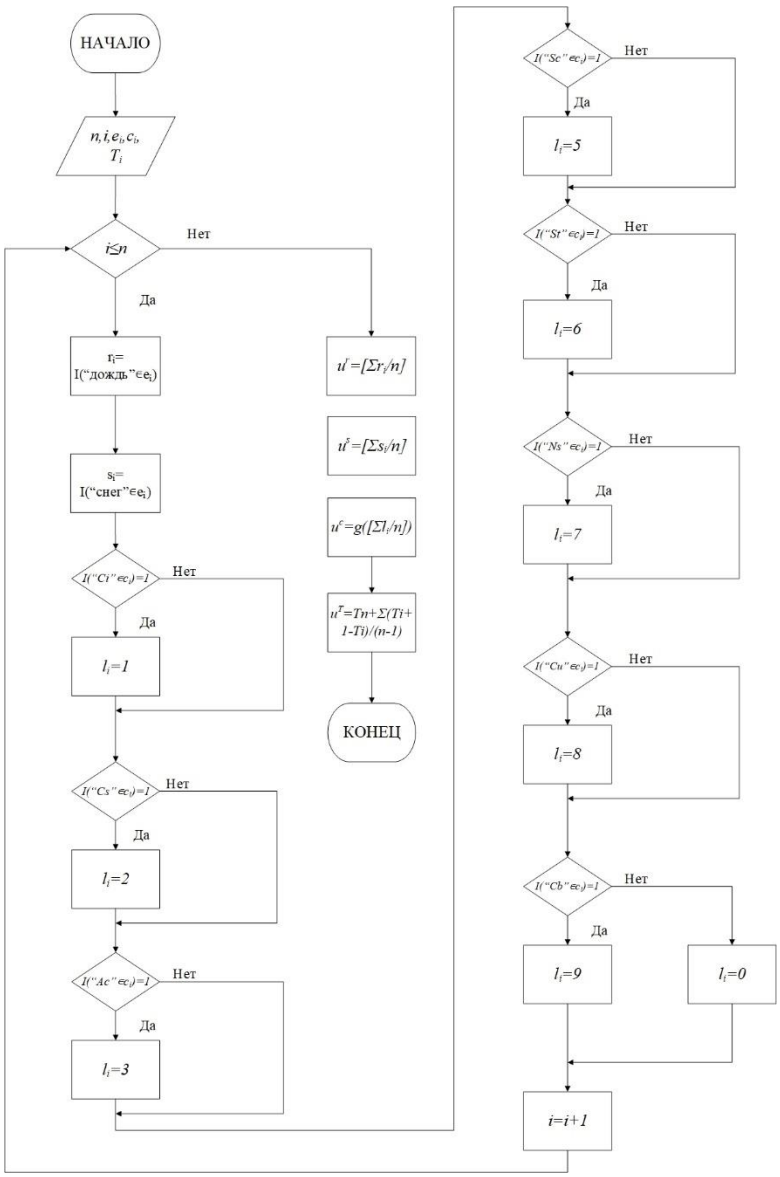


Рисунок 3.5. Детальная схема алгоритма определения индикаторов в неблагоприятных условиях

Определение индексов выполнения критериев. Вначале сформируем требования L к технико-эксплуатационным характеристикам БПЛА.

С учетом приведенной в разделе 1.3 информации, важным при определении влияния дождя и снега являются характеристические цифры кода IP - r_{i1} и r_{i2} для каждого БПЛА соответственно. Поскольку капли дождя имеют жидкое состояние, влияние дождя определяется с использованием r_{i2}. Для беспрепятственной работы l-го БПЛА при наличии дождя $u^r = 1$ значение второй характеристической цифры r_{l2} должно быть не меньше трёх, чтобы БПЛА и его элементы не выходили из строя:

$$r_{l2} \geq 3 \text{ при } u^r = 1. \quad (3.1)$$

С одной стороны, при попадании снежинок на поверхность БПЛА, снег может изменять свое состояние с твердого на жидкое, что приводит к неисправности работы элементов, как и в случае с дождем. Поэтому при определении требований в связи с влиянием снега важно учитывать вторую характеристическую цифру кода IP r_{i2} для БПЛА.

С другой стороны, снежинки представляют собой твердые частицы и могут не таять. Поэтому при определении требований в связи с влиянием снега важно учитывать также первую характеристическую цифру кода IP r_{i1} для БПЛА.

Для исправной работы БПЛА в случае снега необходимо значение второй характеристической цифры не менее трёх (защита от воды). Также для беспрепятственной работы l-го БПЛА при наличии снега значение первой характеристической цифры r_{l1F} должно быть не меньше четырех, чтобы БПЛА и его элементы не выходили из строя.

$$\begin{cases} r_{l2} \geq 3 \text{ при } u^s = 1 \\ r_{l1} \geq 4 \text{ при } u^s = 1 \end{cases}. \quad (3.2)$$

Для определения влияния облачности среди параметров БПЛА должна учитываться предельно допустимая высота полета БПЛА H_i^{max}, поскольку на определенной высоте полёт БПЛА может сопровождаться обледенением или тряской, в связи с чем, полёт БПЛА будет затруднён или БПЛА может быть выведен из строя.

Для поиска оценки вероятности вывода из строя в облаке типа u^{**c} в связи с тряской $P_c^{u^{**c}}$ и оценки вероятности вывода из строя в связи с обледенением $P_s^{u^{**c}}$ воспользуемся субъективными оценками, заданными экспертно. В случае отсутствия опасностей для вывода из строя БПЛА в связи с тряской или обледенением оценку вероятности примем равной нулевой.

Если БПЛА может быть с высокой долей вероятности выведен из строя в связи с тряской или обледенением, то такая оценка вероятности будет равна 1. С учетом вышеизложенного при введении градации из 9 значений опасности вывода из строя в связи с тряской и обледенением получим следующие значения оценок вероятностей вывода из строя в связи с тряской и обледенением, соответствующие данным градациям (см. Табл. Б.5 и Табл. Б.6).

Суммарная оценка вероятности вывода из строя БПЛА в связи с тряской и обледенением $P^{u^{**c}}$ (не только одновременно происходящих) вычисляется по формуле:

$$P^{u^{**c}} = P_c^{u^{**c}} + P_s^{u^{**c}} - P_c^{u^{**c}} P_s^{u^{**c}}. \quad (3.3)$$

Сформированные характеристики отмеченных облаков с учетом Табл. А.10 представлены в Табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристики для облаков разных типов, в которых происходит полет БПЛА

Номер типа облака	**Тип облаков**	**Высота нижней границы, км**	**Оценка вероятности вывода из строя в связи с тряской**	**Оценка вероятности вывода из строя в связи с обледенением**	**Оценка вероятности вывода из строя**
1	Ci	7-10 (7-18)	0.05	0.00	0.05
2	Cs	6-8	0.10	0.05	0.15
3	Ac	2-6	0.30	0.50	0.65
4	As	3-5	0.00	0.70	0.70
5	Sc	0.6-1.5	0.30	0.50	0.65
6	St	0.1-0.7	0.05	0.50	0.53
7	Ns	0.1-1.0	0.05	0.85	0.86
8	Cu	0.8-1.5	0.05	0.05	0.08
9	Cb	0.4-2.0	1.00	1.00	1.00

Из Табл. 3.1 следует, что для беспрепятственной работы l-го БПЛА при заданных предельной высоте полета H_l^{max} и высоте полета H, высоты нижней границы облачности u^c, БПЛА безопасно запускать, если:

$$H_l^{max} \geq H \text{ при } u^c \leq H \text{ и } 1 - P^{u^{**c}} \geq P_{min}, \quad (3.4)$$

где P_{min} – минимальная допустимая оценка вероятности отсутствия вывода из строя в связи с облачностью, задаётся ЛПР. Предположим, что задается P_{min} = 1, если планируется полет, обладающий наибольшей надежностью с точки зрения отсутствия опасности тряски и обледенения при учете облачности. Абсолютно надежный полёт БПЛА невозможен, но возможно обеспечить сопутствующие условия.

Для определения влияния температуры среди параметров БПЛА должны быть учтены диапазоны рабочих температур через минимально и максимально допустимые рабочие температуры T_{i1} и T_{i2}. Для беспрепятственной работы *l*-го БПЛА при минимально и максимально допустимых рабочих температурах T_{l1} и T_{l2} при температуре местности u^T БПЛА безопасно эксплуатировать, если:

$$T_{l1} \leq u^T \leq T_{l2}. \quad (3.5)$$

В качестве критериев *O* рассмотрим допустимости полетов в связи:

- с дождём, определяемая (3.1);
- со снегом, определяемая (3.2);
- с облачностью, определяемая (3.3);
- с температурой, определяемая (3.5).

В качестве индексов *I* выполнения критериев *O* воспользуемся индексами включения, определенными (1.10), принимающими значения 0 и 1 в зависимости от выполнения всех критериев *O*. Обозначим, индексы выполнения критериев для *l*-ых БПЛА как $f_i(A_l)(i = 1, \dots, 4)$, которые принимают значения 0 и 1, в зависимости от выполнения критериев.

Определение матрицы метеорологических ограничений маршрутной сети. Определение матрицы метеорологических ограничений $U^* = \left\| U^*\left(A_l, \Gamma_f\right) \right\|$ маршрутной сети R^* определяется следующим образом:

$$\begin{cases} U^*\left(A_l, \Gamma_f\right) = 0 \text{ при } f_i(A_l) = 1 \text{ для } \forall\, i \\ U^*\left(A_l, \Gamma_f\right) = 1, \text{иначе} \end{cases}. \quad (3.6)$$

Таким образом, детальная логическая схема разработанного алгоритма определения метеорологических ограничений маршрутной сети следующая (см. Рис. 3.6).

Рисунок 3.6. Детальная логическая схема для разработанного алгоритма определения метеорологических ограничений маршрутной сети

Проиллюстрируем разницу между разработанным алгоритмом построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями и существующим. Детальная логическая и блок-схема существующего и разработанного алгоритма построения маршрутной сети в благоприятных и неблагоприятных условиях представлена следующим образом (см. Рис. Б.12, Рис. Б.13, Рис. 3.7, Рис. 3.8).

Рисунок 3.7. Детальная логическая схема разработанного алгоритма построения маршрутной сети в неблагоприятных условиях

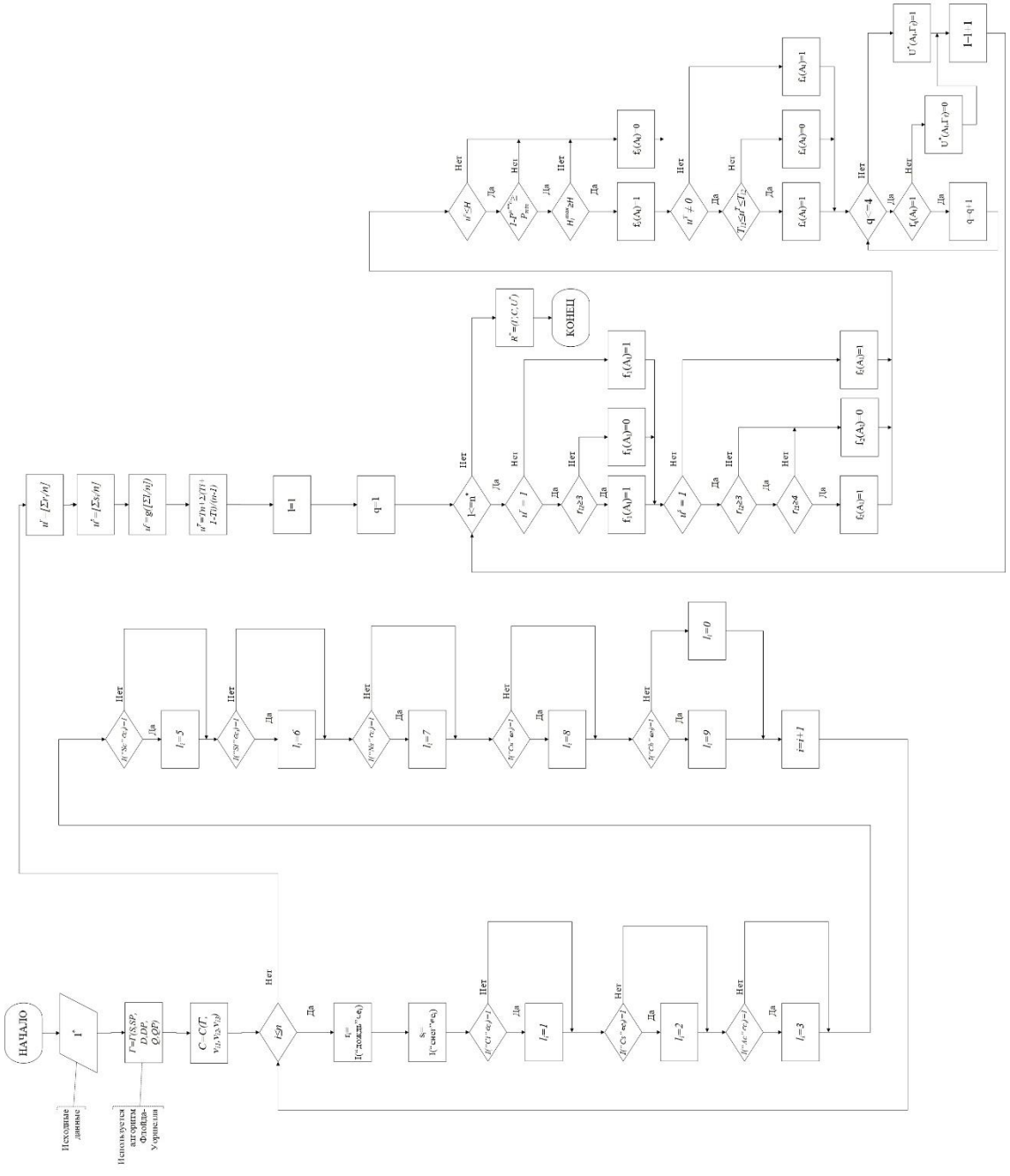


Рисунок 3.8. Схема разработанного алгоритма построения маршрутной сети в неблагоприятных условиях

Таким образом, предложен алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями, входящий в состав разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Представлено определение графа маршрутов, матрицы затрат и формирование метеорологических ограничений в алгоритме с учетом благоприятных и неблагоприятных условий.

3.2. Алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам

В текущей главе описан алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам, входящий в состав разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Назначение предлагаемого алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам заключается в формировании рационального сценария транспортировки грузов (с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА), обеспечивающего наиболее быструю транспортировку грузов для заданной маршрутной сети с метеорологическими ограничениями.

В качестве процесса, при управлении которым используют разработанный алгоритм, выступает планирование и оптимизация транспортировки грузов с использованием гетерогенной группы БПЛА. Обзор и анализ существующих алгоритмов распределения транспортных средств по маршрутам был проведен в разделе 1.2.

Характеристикой качества решения алгоритма является полученный показатель стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА при минимальной продолжительности транспортировки грузов.

Ввод исходных данных. Исходные данные разработанного алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам:

- R^* – маршрутная сеть;

– множество $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{n^*}\}$ – множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство A_l характеризуется набором параметров $A_{P\,l}$, в которые входят тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость v_{i1}, скорость взлета v_{i2} и скорость посадки v_{i3}, максимальная грузоподъёмность v_{i4}, стоимость летнего часа v_{i5}, первая характеристическая цифра кода IP r_{i1}, вторая характеристическая цифра кода IP r_{i2}, предельно допустимая высота полета H_i^{max}, минимально допустимая рабочая температура T_{i1}, максимально допустимая рабочая температура T_{i2}.

– множество грузов различных типов G. Каждый тип груза G_k характеризуется набором параметров GP_k, в которые входят сам тип груза g_{k1}, масса груза g_{k2}, стоимость груза g_{k3}. Считается, что приоритетности у грузов равны.

– матрица $T^S = \|T(S_i, G_k)\|$, элементы которой задают величины запасов груза *k*-го типа в источнике S_i.;

– матрица $T^D = \|T(D_j, G_k)\|$, элементы которой задают величины потребностей в грузе *k*-го типа в стоке D_j;

– $Z = \|V(S_i \cup D_j \cup Q_r, A_l)\|$ – матрица распределений БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Элементы матрицы задают количество единиц БПЛА *l*-го типа, находящихся в текущий момент в каждом из перечисленных пунктов.

Реконфигурация гетерогенной группы БПЛА. Реконфигурация гетерогенной группы БПЛА A при метеорологических ограничениях $U^* = \|U^*(A_l, \Gamma_f)\|$ маршрутной сети R^* происходит следующим образом:

$$\begin{cases} A_l \in A^* \text{ при } U^*(A_l, \Gamma_f) = 1 \\ A_l \notin A^*, \text{иначе} \end{cases}. \quad (3.7)$$

Таким образом, в сценарии транспортировки грузов могут участвовать лишь БПЛА, которые удовлетворяют условиям в (3.7), основанным на метеорологических ограничениях маршрутной сети.

Поиск рационального сценария. Поиск рационального сценария транспортировки грузов X посредством поиска распределения БПЛА, входящих в реконфигурируемую группу БПЛА A^*, по маршрутам сети R^* производится в соответствии с постановкой, представленной в разделе 1.2.

Вводятся обозначения:

1) N – число узлов маршрутной сети;
2) d_{ij} $(i, j = 1, ..., N)$ – расстояние между i-м и j-м узлами транспортной сети;
3) a_{ij} $(i, j = 1, ..., N)$ – объем груза, необходимого для транспортировки из i-го узла транспортной сети в j-й узел в течение всего периода планирования;
4) K – общее количество доступных БПЛА, соответствует мощности множества $|A^*|$;
5) V_k $(k=1, \ldots, K)$ – набор технических и эксплуатационных параметров k-го БПЛА, соответствует введенным в разделе 2.1;
6) c_k $(k = 1, \ldots, K)$ – удельные затраты на эксплуатацию k-го БПЛА на единицу времени;
7) T – продолжительность периода планирования;
8) L_k $(k = 1, \ldots, K)$ – максимально допустимое количество перелетов, которое может выполнить k-й БПЛА в течение периода планирования T;
9) $l(k)$ $(l(k) = 1, \ldots, L_k)$ – показатель, задающий номер перелета, выполняемого k-м БПЛА;
10) h_{ij}^k $(k = 1, \ldots, K;\ i, j = 1, ..., N)$ – индикатор допустимости перелета, принимает значение 1, если k-й БПЛА может совершить перелет из i-го узла транспортной сети в j-й узел, и 0 – иначе (при этом $h_{ii}^k = 0$ $\forall i = 1, \ldots N, k = 1, \ldots, K$);

11) TP^k – время, требуемое для выполнения операций по обслуживанию k-го БПЛА перед вылетом и после завершения перелета;

12) T_{ij}^k ($k = 1, \ldots, K$; $i, j = 1, \ldots, N$) – средняя продолжительность перелета k-го БПЛА из i-го узла транспортной сети в j-й узел, определяется из матрицы затрат C для заданной маршрутной сети R^*.

Переменными задачи являются следующие бинарные величины:

$X = \left\| x_{i,j,l(k)}^k \right\|$ ($k = 1, \ldots, K$; $i, j = 1, \ldots, N$; $l(k) = 1, \ldots, L_k$) – индикатор выполнения k-м БПЛА перелета с номером $l(k)$ из i-го узла транспортной сети в j-й узел.

Требуется минимизировать суммарные затраты на транспортировку груза в течение периода планирования:

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \left(x_{i,j,l(k)}^k \cdot T_{i,j}^k \right) \to min, \tag{3.8}$$

при ограничениях:

1) Бинарные переменные, соответствующие перелету из узла транспортной сети в тот же самый узел, тождественно равны нулю:

$$x_{i,i,l(k)}^k = 0 \ (k=1, \ldots, K;\ i=1, \ldots, N;\ l(k)=1, \ldots, L_k). \tag{3.9}$$

2) БПЛА не может выполнять более одного перелета одновременно:

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^k \leq 1 \ (k = 1, \ldots, K; l(k) = 1, \ldots, L_k). \tag{3.10}$$

3) Последовательность выполняемых каждым БПЛА перелетов должна начинаться с перелета, имеющего номер 1, и не должна иметь разрывов:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)+1}^{k} \le \sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \qquad (3.11)$$

$$(k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N;\ l(k) == 1, \dots, L_k - 1).$$

4) После завершения очередного перелета БПЛА может совершить следующий, по одному из разрешенных для него маршрутов, либо остаться в пункте базирования:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} \le 1 - \sum_{j=1}^{N} \left(x_{i,j,l(k)+1}^{k} \cdot \left(1 - h_{i,j}^{k}\right)\right). \qquad (3.12)$$

5) Суммарное время пребывания БПЛА на маршруте ограничено продолжительностью периода планирования:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j,l(k)=1}^{k} \cdot TP^{k}\right) + \sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j,l(k)}^{k} \cdot \left(T_{i,j}^{k} + TP^{k}\right)\right) \le \qquad (3.13)$$

$$\le T\ (k = 1, \dots, K).$$

6) В конце периода планирования каждый БПЛА должен оказаться в пункте базирования:

$$\sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{j=1}^{N} x_{i,j,l(k)}^{k} = \sum_{l(k)=1}^{L_k}\sum_{j=1}^{N} x_{j,i,l(k)}^{k} \qquad (3.14)$$

$$(k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N).$$

Для решения задачи (3.8) с ограничениями (3.9) - (3.14) применяются алгоритмы The Clarke & Wright [59], Sweep [60], GGA [103], ACS [104], отмеченные в разделе 1.2. Считаем, что полученные решения являются Парето-оптимальными и обладают одинаковой значимостью. ЛПР может выбрать любой из предложенных сценариев.

Расчет стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. С учетом представленных обозначений модели показатель стоимостной оценки отсутствия простоев можно выразить следующим образом:

$$E(X^*) = C^*(X^*) + E_1^*(X^*), \tag{3.15}$$

где X^* - найденный рациональный сценарий транспортировки грузов в задаче (3.8) с ограничениями (3.9) - (3.14);

$C^*(X^*)$ – стоимость грузов, перевозимых при найденном сценарии транспортировки грузов;

а $E_1^*(X^*)$ определяется по формуле:

$$E_1^*(X^*) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \left(v_{i5} * x_{i,j,l(k)}^{*k} \cdot T_{i,j}^{k} \right). \tag{3.16}$$

Детальные схемы для предлагаемого алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам представлены следующим образом (см. Рис. 3.9, Рис. 3.10).

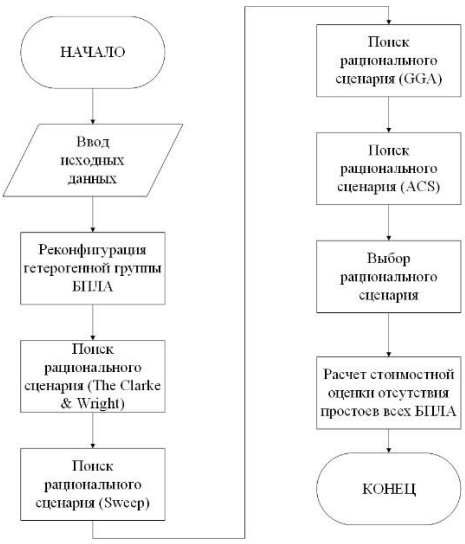


Рисунок 3.9. Детальная логическая схема предлагаемого алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам

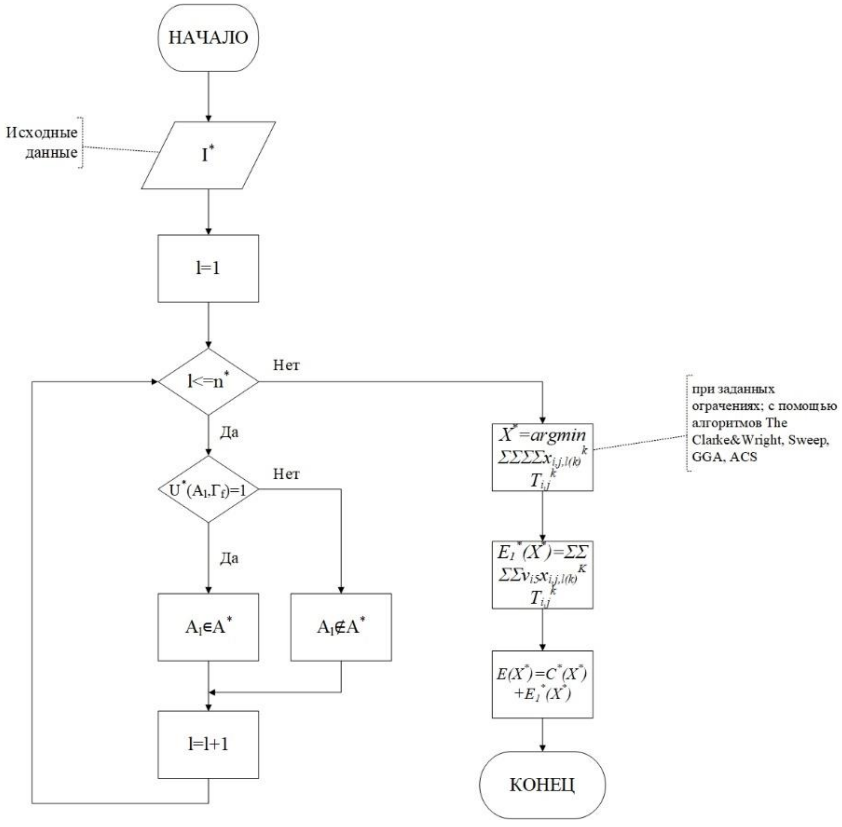


Рисунок 3.10. Детальная схема предлагаемого алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам

С учетом обозначенного ранее в разделах 3.1 и 3.2 детальная схема алгоритма планирования и оптимизации транспортировки грузов при метеорологических ограничениях маршрутной сети в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП выглядит следующим образом (см. Рис. 3.11, Рис. 3.12).

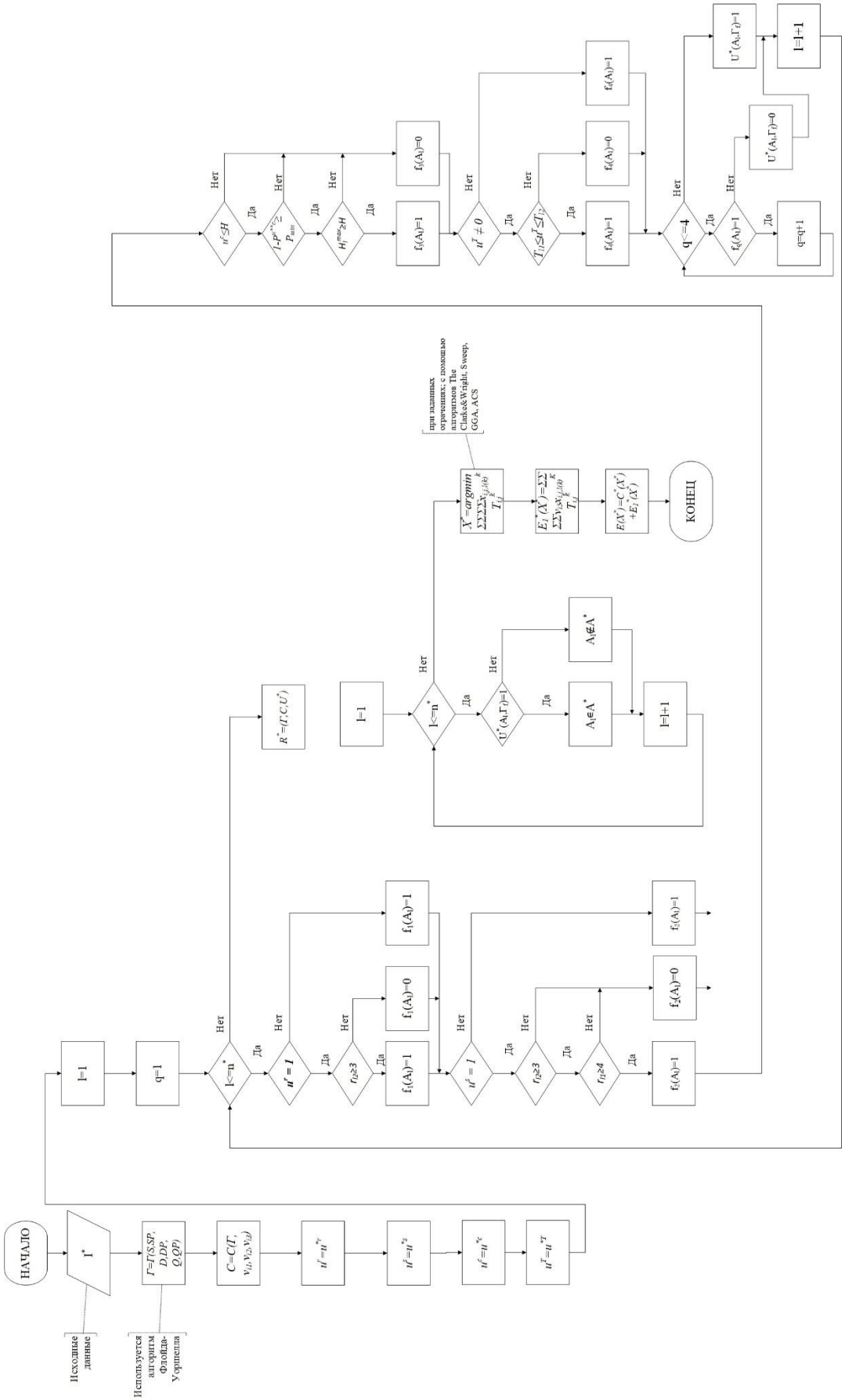


Рисунок 3.11. Детальная схема алгоритма планирования и оптимизации транспортировки грузов в благоприятных условиях

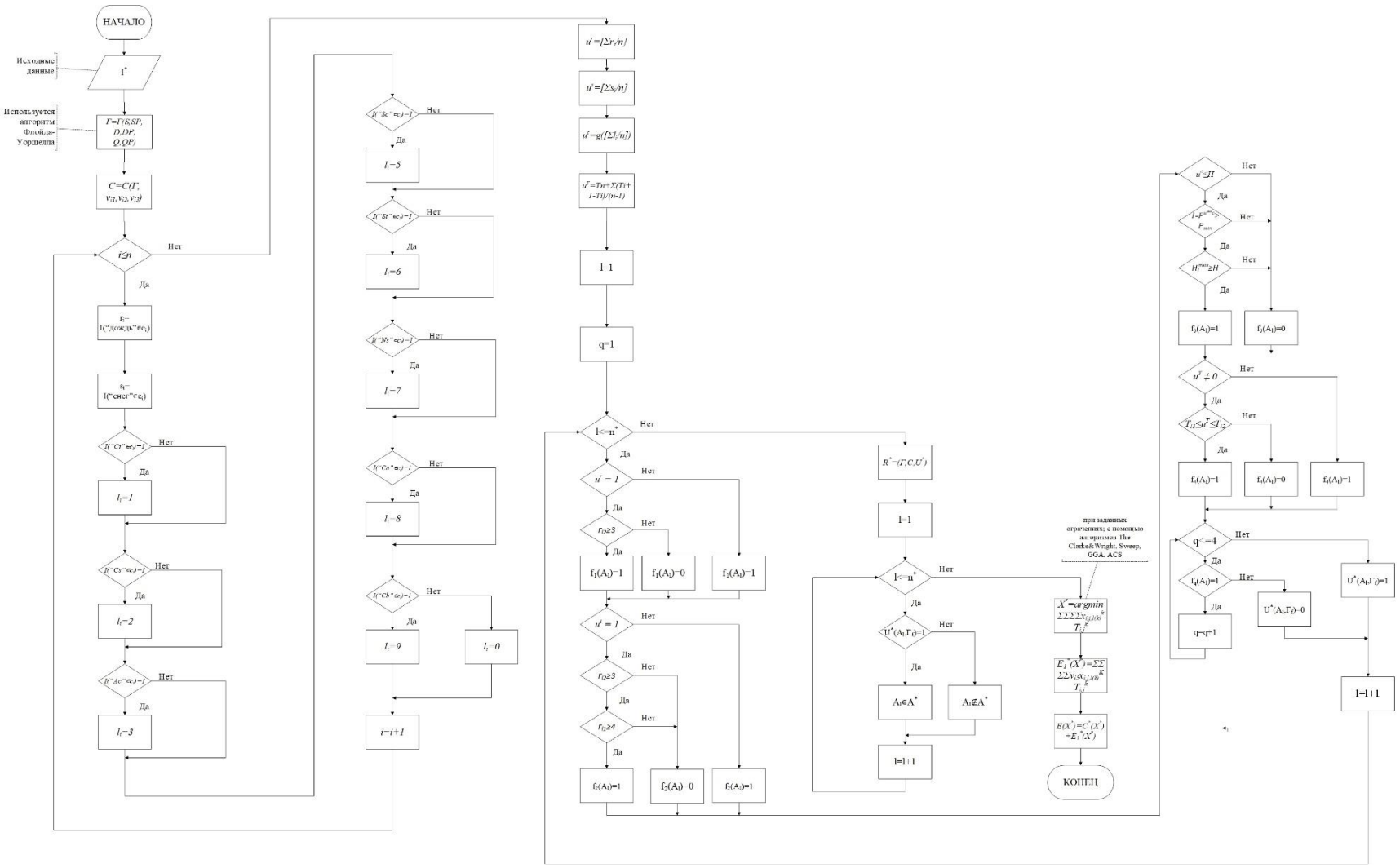


Рисунок 3.12. Детальная схема алгоритма планирования и оптимизации транспортировки грузов в неблагоприятных условиях

Таким образом, предложен алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам, входящий в состав разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Описана реконфигурация группы БПЛА с учетом метеорологических ограничений маршрутной сети, а также расчет рационального сценария транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

3.3. Масштабируемость алгоритмического обеспечения

В текущем разделе представим новые алгоритмы и модификации алгоритмов разработанного информационного обеспечения, посредством учета которых можно расширить алгоритмическое обеспечение для применения в новых условиях.

С учетом изложенного ранее в разделах 3.1 и 3.2 можно представить детальные логические схемы работы разработанного и существующего алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в благоприятных и неблагоприятных условиях функционирования АМИП (см. Рис. Б.14 и Рис. 3.13).

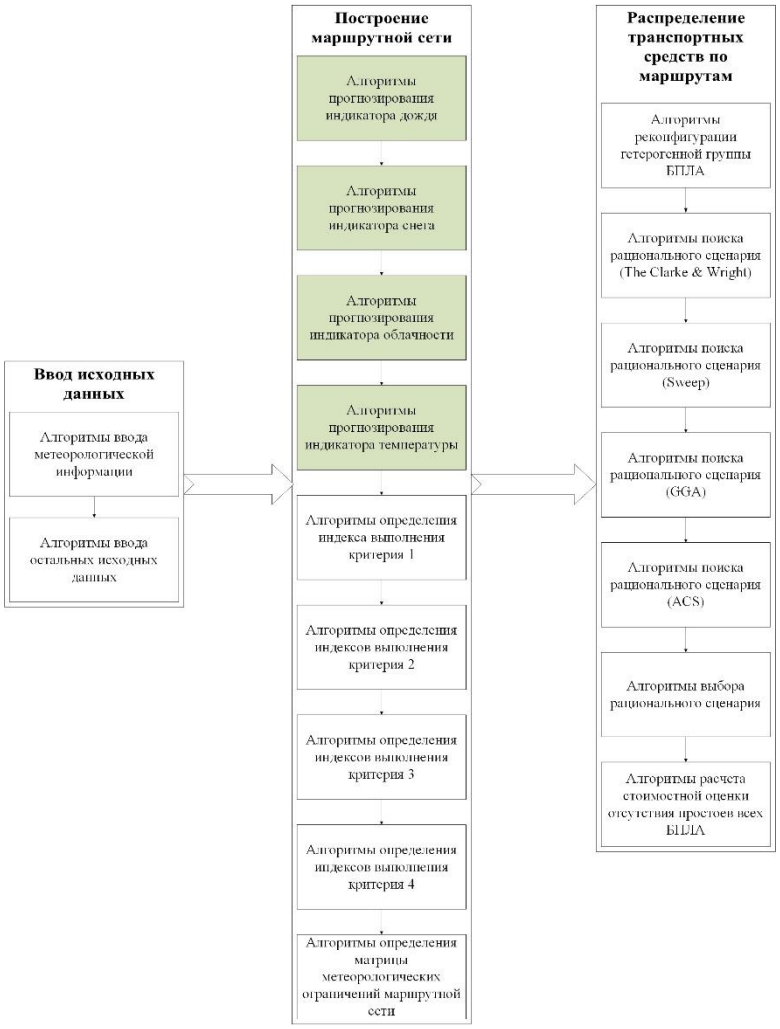


Рисунок 3.13. Детальная логическая схема работы разработанного алгоритмического обеспечения в неблагоприятных условиях

Общая масштабируемость алгоритмического обеспечения. Общая масштабируемость алгоритмического обеспечения предполагает расширение состава алгоритмического обеспечения посредством добавления новых алгоритмов. Перечень таких алгоритмов приведен в Табл. 3.2.

Таблица 3.2 - Перечень алгоритмов для расширения разработанного алгоритмического обеспечения

Алгоритмы	**Краткое описание**	**Место в обеспечении для внедрения**
Алгоритмы формирования плана транспортировки грузов (представлены в разделе 1.2)	Определяют доступные на текущий момент в транспортной сети маршруты для транспортировки грузов и какое количество единиц груза каждого типа подлежит транспортировке по	После алгоритма построения маршрутной сети с прогнозными метеорологическими ограничениями

Алгоритмы	Краткое описание	Место в обеспечении для внедрения
	выбранным маршрутам с учетом заданного критерия	
Алгоритмы выбора транспортных средств с заданными характеристиками (представлены в разделе 1.2)	Определяют доступные БПЛА, входящие в группу, способные осуществлять доставку, следуя найденному плану транспортировки грузов	После алгоритма формирования плана транспортировки грузов
Алгоритмы формирования плана загрузки транспортных средств (представлены в разделе 1.2)	Определяют план загрузки БПЛА, отражающий количество единиц груза, транспортируемых по определенным маршрутам на определенных БПЛА, с учетом заданного критерия	После алгоритма выбора транспортных средств с заданными характеристиками
Алгоритмы оптимального размещения загрузки грузов (представлены в разделе 1.2)	Определяют вариант загрузки БПЛА с учетом полноты использования штатного грузового объема и грузоподъемности БПЛА	После алгоритма формирования плана загрузки транспортных средств
Алгоритмы оценки и поиска оптимального сценария (представлены в разделе 1.2)	Определяют задача комплексной оценки сформированных сценариев по набору критериев и выбора на основе этого наиболее предпочтительного сценария или сценариев, который далее будут реализованы	После алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам

Алгоритмы, представленные в Табл. 3.2, могут быть модифицированы посредством использования иных математических методов и выбора разных критериев эффективности, что было отражено в разделе 1.2.

Масштабируемость алгоритма построения маршрутной сети с прогнозными метеорологическими ограничениями. Масштабируемость разработанного алгоритма построения маршрутной сети с прогнозными метеорологическими ограничениями предполагает модификации алгоритма для его этапов:

- определения графа Г;
- определения матрицы затрат C;
- определения метеорологических ограничений маршрутной сети U^*.

Рассмотрим возможные модификации для каждого этапа. Модификации для части алгоритма, реализующей определение графа Г, представлены в Табл. 3.3.

Таблица 3.3 - Перечень модификаций для построения графа в разработанном алгоритме построения маршрутной сети

Модификации	**Краткое описание**
Модификации траектории взлета и посадки Модификации высоты полета	Формирование специальных траекторий для взлета и посадки, отличных от заданных в алгоритме Высота полета может быть не постоянной на всех участках маршрутов, где проходит взлет, посадка и горизонтальный полет
Модификации вершин графа	Отсутствие промежуточных пунктов
Модификации численных методов	Применение иных методов для поиска кратчайших путей на графе (см. Табл. А.2)

Модификации для части алгоритма, реализующей определение матрицы затрат *C*, представлены в Табл. 3.4.

Таблица 3.4 - Перечень модификаций для определения матрицы затрат в разработанном алгоритме построения маршрутной сети

Модификации	**Краткое описание**
Модификация выбора ресурсов	Выбор иного типа ресурсов, связанных с экономичностью, производительностью, результативностью и др.
Увеличение размерности матрицы / формирование множества матриц	Происходит посредством учета новых типов ресурсов, связанных с экономичностью, производительностью, результативностью и др.
Модификация расчета затрат временных ресурсов	Отсутствие в расчете учета временных затрат, связанных со взлетом, посадкой или горизонтальным полетом

Модификации для части алгоритма, реализующей определение метеорологических ограничений маршрутной сети U^*, представлены в Табл. 3.5.

Таблица 3.5 - Перечень модификаций для определения метеорологических ограничений маршрутной сети

Модификации	**Краткое описание модификации**
Модификации определения прогнозного индикатора дождя	Применение иных методов экстраполяции, отмеченных в разделе 1.3 и разделе 2.3
Модификации определения прогнозного индикатора снега	Применение иных методов экстраполяции, отмеченных в разделе 1.3 и разделе 2.3

Модификации	Краткое описание модификации
Модификации определения прогнозного индикатора облачности	Применение иных методов экстраполяции, отмеченных в разделе 1.3 и разделе 2.3
Модификации определения прогнозного индикатора температуры	Применение иных методов экстраполяции, отмеченных в разделе 1.3 и разделе 2.3
Модификации выбора и определения новой группы индикаторов	Отсутствие/наличие определения индикатора дождя, снега, облачности, температуры в их комбинации, присутствие новых индикаторов
Модификации определения индексов выполнения критериев	Изменение предложенных критериев (наличие или отсутствие критериев, новые критерии), изменение оценки выполнимости критериев
Модификации определения матрицы дополнительных ограничений маршрутной сети	Изменение расчета матрицы дополнительных ограничений маршрутной сети на основе индексов выполнения критериев

Масштабируемость алгоритма распределения транспортных средств с заданными характеристиками. Масштабируемость разработанного алгоритма распределения транспортных средств с заданными характеристиками предполагает модификации алгоритма для его этапов:

- реконфигурация гетерогенной группы БПЛА A при прогнозных метеорологических ограничениях $U^* = \left\| U^*\left(A_l, \Gamma_f\right) \right\|$ маршрутной сети R^* в группу БПЛА A^*;
- поиск рационального сценария транспортировки грузов X посредством поиска распределения БПЛА, входящих в реконфигурируемую группу БПЛА A^*, по маршрутам сети R^*, вместе с определением показателя E стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА для найденного сценария.

Рассмотрим возможные модификации для каждого этапа. Модификации для части алгоритма, реализующей реконфигурацию гетерогенной группы БПЛА A при прогнозных метеорологических ограничениях $U^* = \left\| U^*\left(A_l, \Gamma_f\right) \right\|$ маршрутной сети R^* в группу БПЛА A^*, представлены в Табл. 3.6.

Таблица 3.6 - Перечень модификаций для реконфигурации группы в алгоритме распределения транспортных средств по маршрутам

Модификации	**Краткое описание**
Модификация реконфигурации в части необходимости проведения	Проверка условия, связанного с метеорологическим ограничением для БПЛА, может вносить вклад в общую оценку необходимости реконфигурации, а не быть строго заявлена
Учет дополнительных новых ограничений маршрутной сети	Проверка дополнительных условий, связанных с ограничениями маршрутной сети (при этом она может быть проведена в отдельном алгоритме)

Модификации для части алгоритма, реализующей поиск рационального сценария транспортировки грузов *X*, представлены в Табл. 3.7.

Таблица 3.7 - Перечень модификаций для поиска рационального сценария транспортировки грузов в алгоритме распределения транспортных средств по маршрутам

Модификации	**Краткое описание**
Использование иных критериев эффективности	Расчет критериев эффективности, определяющих качество, экономичность, действенность, производительность, прибыльность, результативность, комбинированного или др.
Использование иных численных методов поиска решения	Использование иных эвристических и/или метаэвристических методов, обладающих своими преимуществами и недостатками (см. Табл. А.6)

Приведенные возможности общего масштабирования, масштабирования алгоритма построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями и алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам определяют гибкость разработанного алгоритмического обеспечения и дают возможности для дальнейшего развития.

Выводы по Главе 3

Разработано алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, отличающееся от существующих алгоритмом построения маршрутной сети и

алгоритмом распределения транспортных средств по маршрутам, работающими при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, которое поддерживает принятие решения на стратегическом уровне управления в части формирования рационального сценария транспортировки грузов и соответствующего ему показателя стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Предложен алгоритм построения маршрутной сети с учетом неблагоприятных условий функционирования АМИП. Представлено определение графа маршрутов, матрицы затрат и формирование метеорологических ограничений в предложенном алгоритме с учетом благоприятных и неблагоприятных условий.

Предложен алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам. Представлен подход к реконфигурации гетерогенной группы БПЛА при метеорологических ограничениях маршрутной сети. Описан подход к поиску рационального сценария транспортировки грузов и расчету показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА в алгоритме.

Описана масштабируемость разработанного алгоритмического обеспечения. Представлены алгоритмы, посредством внедрения которых можно расширить алгоритмическое обеспечение для применения в новых условиях. Предложены модификации частей предложенных алгоритмов, входящих в состав разработанного алгоритмического обеспечения.

Результаты данной Главы опубликованы в работах [110-122].

Глава 4. Оценка результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов

4.1. Оценка результатов разработанного метода обработки метеорологической информации посредством проведения вычислительных экспериментов

В текущем разделе проводятся вычислительные эксперименты с целью подтверждения работоспособности и эффективности в части оперативности и определения прогнозных индикаторов разработанного метода обработки метеорологической информации для АМИС с оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИС, представленного в разделе 2.3.

Вначале проверим работоспособность разработанного метода, а затем его эффективность.

Выдвижение гипотезы №1 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в виде прогнозных индикаторов – индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности (в данном случае представленного типом облачности) и индикатора температуры.

Планирование эксперимента №1.

Предложим следующую последовательность проведения испытаний в эксперименте:

1) подготовка исходных данных;
2) определение прогнозных индикаторов дождя в разработанном методе;
3) определение прогнозных индикаторов снега в разработанном методе;
4) определение прогнозных индикаторов облачности в разработанном методе;
5) определение прогнозных индикаторов температуры в разработанном методе.

Количество испытаний – 804.

Исходные данные формируются из части реальных суточных статистических данных за 1 год для трех городов, поскольку они обеспечивают относительно высокую точность данных на различных участках области исследуемых значений и стремятся в любой части экспериментальной кривой иметь одинаковую точность. Формируется по 269 исходных выборок готовых статистических данных об изменениях в наличии дождя, наличии снега, типе облачности и температуре для каждого из городов следующим образом: для каждого нового прогноза используются значения имеющихся статистических сведений до заданного индекса.

Это означает, что проверяется, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС представляет итоговые результаты обработки в виде 804 наборов прогнозных индикаторов – индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности (в данном случае представленного типом облачности) и индикатора температуры. Полученные результаты, соответствующие шагам 2-5 эксперимента, выводятся в графиковом описании.

Для реализации метода предлагается использовать программную среду, написанную на языке Python 3.

Проведение эксперимента №1. Подготовка исходных данных. Соберем реальные исходные суточные статистические данные из сети Интернет за 2023 год в районы, расположенные недалеко от Москвы, Петропавловска-Камчатского и Архангельска по каждому дню [123]. Считается, что доставка в такие районы может быть затруднительной, поскольку они находятся далеко от транспортных магистралей и обладают слабо развитым транспортно-логистическим сервисом. Таким образом, надобность в применении БПЛА является более высокой, чем в городских условиях. Более того, после анализа [124-127], был сделан вывод, что полёт в таких зонах, скорее всего, будет легче реализован в будущем. Сами города: Москва, Петропавловск-Камчатский,

Архангельск выбраны такими, поскольку предположительно обладают различными характерными метеорологическими условиями.

Получим следующие количества статистических строк БД по трем районам:

- Москва – 1734 строки;
- Петропавловск – Камчатский – 1479 строк;
- Архангельск – 1724 строки.

Табличные исходные данные за 2023 год с учетом дат представлены в БД на Рис. В.1, Рис. В.2.

Далее, из сформированной БД, создаются по 268 исходных выборок готовых статистических данных об изменениях в наличии дождя, наличии снега, типе облачности и температуре для каждого из городов. Отобразим по 269 значений статистически предлагаемых исходных данных.

Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске в эксперименте №1 представлены на Рис. В.3 – В.5, показателя «Индикатор снега» - на Рис. В.6 – В.8, показателя «Индикатор облачности» - на Рис. В.9 – В.11, показателя «Температура» - на Рис. В.12 – В.14.

Определение прогнозных индикаторов дождя в эксперименте №1. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор дождя» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. В.15 – В.17.

Определение прогнозных индикаторов снега в эксперименте №1. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор снега» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. В.18 – В.20.

Определение прогнозных индикаторов облачности в эксперименте №1. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор облачности» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. В.21 – В.23.

Определение прогнозных индикаторов температуры в эксперименте №1. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор температуры»

в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. В.24 – В.26.

Вывод из эксперимента №1. Таким образом, можно сделать следующий вывод. Определение индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности и индикатора температуры возможно с применением разработанного метода.

Следовательно, гипотеза №1 о том, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в виде прогнозных индикаторов – индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности и индикатора температуры, верна.

Выдвижение гипотезы №2 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в оперативном режиме.

Планирование эксперимента №2.

Предложим следующую последовательность проведения испытаний в эксперименте:

1) подготовка исходных данных;
2) определение прогнозных индикаторов дождя и времени получения этих решений в разработанном методе;
3) определение прогнозных индикаторов снега и времени получения этих решений в разработанном методе;
4) определение прогнозных индикаторов облачности и времени получения этих решений в разработанном методе;
5) определение прогнозных индикаторов температуры и времени получения этих решений в разработанном методе;
6) определение среднего суммарного времени получения итоговых результатов обработки с целью определения оперативности метода.

Количество испытаний – 4936.

Исходные данные формируются из реальных суточных статистических данных за 1 год для трех городов, поскольку они обеспечивают относительно высокую точность данных на различных участках области исследуемых значений и стремятся в любой части экспериментальной кривой иметь одинаковую точность. Формируются расширенные исходные выборки готовых статистических данных об изменениях в наличии дождя, наличии снега, типе облачности и температуре для каждого из городов следующим образом: для каждого нового прогноза используются значения имеющихся статистических сведений до заданного индекса.

Это означает, что проверяется, что что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС 4936 итоговых результатов обработки в оперативном режиме. Полученные результаты, соответствующие шагам 2-6 эксперимента, выводятся в таблично-графиковом описании.

Для реализации метода предлагается использовать программную среду, написанную на языке Python 3.

Проведение эксперимента №2. Подготовка исходных данных.

Расширенные табличные исходные данные, взятые за 2023 год с учетом дат, были представлены в БД на Рис. В.1, Рис. В.2. Далее, из сформированной БД, создаются расширенные исходные выборки готовых статистических данных об изменениях в наличии дождя, наличии снега, типе облачности и температуре для каждого из городов. Отобразим значения статистически предлагаемых исходных данных.

Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске в эксперименте №2 представлены на Рис. В.27 – В.29, показателя «Индикатор снега» - на Рис. В.30 – В.32, показателя «Индикатор облачности» - на Рис. В.33 – В.35, показателя «Температура» - на Рис. В.36 – В.38.

Определение прогнозных индикаторов дождя и времени получения этих решений в эксперименте №2. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор дождя» в Москве за соответствующее время представлены на Рис. В.39 и Рис. В.40. Среднее время получения прогнозных индикаторов дождя в Москве в эксперименте №2 в миллисекундах – 56, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов дождя в Москве в эксперименте №2 – 1858.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор дождя» в Петропавловске-Камчатском за соответствующее время представлены на Рис. В.41 и Рис. В.42. Среднее время получения прогнозных индикаторов дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 в миллисекундах – 38, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 – 755.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор дождя» в Архангельске за соответствующее время представлены на Рис. В.43 и Рис. В.44. Среднее время получения прогнозных индикаторов дождя в Архангельске в эксперименте №2 в миллисекундах – 47, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов дождя в Архангельске в эксперименте №2 – 1130.

Определение прогнозных индикаторов снега и времени получения этих решений в эксперименте №2. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор снега» в Москве за соответствующее время представлены на Рис. В.45 и Рис. В.46. Среднее время получения прогнозных индикаторов снега в Москве в эксперименте №2 в миллисекундах – 49, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов снега в Москве в эксперименте №2 – 1227.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор снега» в Петропавловске-Камчатском за соответствующее время представлены на Рис. В.47 и Рис. В.48. Среднее время получения прогнозных индикаторов снега в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 в миллисекундах –

36, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов снега в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 – 720.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор снега» в Архангельске за соответствующее время представлены на Рис. В.49 и Рис. В.50. Среднее время получения прогнозных индикаторов дождя в Москве в эксперименте №2 в миллисекундах – 51, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов дождя в Москве в эксперименте №2 – 1324.

Определение прогнозных индикаторов облачности и времени получения этих решений в эксперименте №2. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор облачности» в Москве за соответствующее время представлены на Рис. В.51 и Рис. В.52. Среднее время получения прогнозных индикаторов облачности в Москве в эксперименте №2 в миллисекундах – 46, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов облачности в Москве в эксперименте №2 – 1191.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор снега» в Петропавловске-Камчатском за соответствующее время представлены на Рис. В.53 и Рис. В.54. Среднее время получения прогнозных индикаторов облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 в миллисекундах – 37, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 – 738.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор облачности» в Архангельске за соответствующее время представлены на Рис. В.56 и Рис. В.56. Среднее время получения прогнозных индикаторов облачности в Архангельске в эксперименте №2 в миллисекундах – 44, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов облачности в Архангельске в эксперименте №2 – 1119.

Определение прогнозных индикаторов температуры и времени получения этих решений в эксперименте №2. Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор температуры» в Москве за соответствующее время представлены на Рис. В.57 и Рис. В.58. Среднее

время получения прогнозных индикаторов температуры в Москве в эксперименте №2 в миллисекундах – 32, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов температуры в Москве в эксперименте №2 – 506.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор температуры» в Петропавловске-Камчатском за соответствующее время представлены на Рис. В.59 и Рис. В.60. Среднее время получения прогнозных индикаторов температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 в миллисекундах – 28, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2 – 398.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор температуры» в Архангельске за соответствующее время представлены на Рис. В.61 и Рис. В.62. Среднее время получения прогнозных индикаторов температуры в Архангельске в эксперименте №2 в миллисекундах – 38, дисперсия времени получения прогнозных индикаторов температуры в Архангельске в эксперименте №2 – 768.

Определение среднего суммарного времени получения итоговых результатов обработки с целью определения оперативности метода. Результаты среднего времени определения прогнозных индикаторов в разработанном методе представлены в Табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Результативная информация по времени определения прогнозных индикаторов в эксперименте №2

Определение прогнозного индикатора	**Среднее время получения решения, мс**
Определение прогнозного индикатора дождя	47
Определение прогнозного индикатора снега	45
Определение прогнозного индикатора облачности	43
Определение прогнозного индикатора температуры	33
Определение набора прогнозных индикаторов (суммарно)	169

Обработка и анализ результатов эксперимента №2. Из Табл. 4.1 следует, что определение индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности, индикатора температуры по отдельности и комплексно с применением разработанного метода производится оперативно, поскольку требует небольших временных затрат. Дополним информативность полученного результата в виде среднего суммарного времени получения итоговых результатов обработки с применением разработанного метода. Будем считать, что итоговая выборка является репрезентативной, если её отдельные выборки репрезентативны. Средние значения прогнозных и существующих индикаторов отражены в Табл. В.1.

Выборки индикатора дождя и индикатора снега обладают распределением Бернулли. Применим для них проверку статистических гипотез о равенстве вероятности «успеха». Результаты отражены в Табл. В.2 и Табл. В.3.

Из Табл. В.2 и Табл. В.3 следует, что гипотезы о равенстве вероятностей «успеха» по Бернулли для выборок могут отклоняться. В основном это вызвано тем, что прогнозирование на основе среднего уровня ряда динамики влечет за собой частый учет «не успеха» по Бернулли, в случае если большинство данных дают «успех» по Бернулли. Однако, значимость результатов может подтверждаться иначе: из Табл. В.2 и Табл. В.3 видно, что моды прогнозных и существующих, как правило, будут совпадать и равны 0, а значит прогнозирование будет работать для них эффективно.

Для выборок индикаторов облачности сделаем проверку, что описывающие их средние значения отличаются не более, чем на 5%. Проверка для дисперсий не проводится, поскольку дисперсия является сравнительно малой величиной. Сделать иные проверки статистических гипотез, которые бы поддерживали итоговые результаты, не является рациональным, поскольку распределение не является нормальным, непрерывным и распределением Бернулли. Результаты проверок отражены в Табл. В.4.

Для выборок индикаторов температур проведём проверки статистических гипотез на основе *t*-критерия Стьюдента. Результаты проверок отражены в Табл. В.5.

Следовательно, можно утверждать, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в оперативном режиме.

4.2. Оценка результатов разработанного алгоритмического обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов

В текущем разделе проводятся вычислительные эксперименты с целью подтверждения работоспособности и эффективности в части улучшения поддержки принятия решения посредством повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА для разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, описанного в Главе 3.

Вначале проверим работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения, а затем его эффективность.

Выдвижение гипотезы №1 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП обеспечивает расчет рационального сценария транспортировки грузов и соответствующего ему показателя стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Планирование эксперимента №1.

Предложим следующую последовательность проведения испытаний в эксперименте:

1) подготовка исходных данных;
2) построение маршрутных сетей с использованием разработанного алгоритма построения маршрутной сети;
3) поиск рациональных сценариев транспортировки грузов и соответствующих показателей стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА с использованием предложенного алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам.

Количество испытаний – 804.

Исходные данные эксперимента следующие.

Множество W^* формируется по аналогии с планируемыми в разделе 4.1 для эксперимента №1.

Задано множество $A = \{A_1, A_2, A_3\}$ – множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство A_l характеризуется набором параметров A_{Pl}, в которые входят тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость v_{i1}, скорость взлета v_{i2} и скорость посадки v_{i3}, максимальная грузоподъёмность v_{i4}, стоимость летного часа v_{i5}, первая характеристическая цифра кода IP r_{i1}, вторая характеристическая цифра кода IP r_{i2}, предельно допустимая высота полета H_i^{max}, минимально допустимая рабочая температура T_{i1}, максимально допустимая рабочая температура T_{i2}. В качестве используемых БПЛА рассматриваются БПЛА трёх типов с заданным набором характеристик.

Задана высота полета H относительно высоты местности.

Выбраны три района, расположенные недалеко от Москвы, Петропавловска-Камчатского и Архангельска, аналогичные заявленным в качестве исходных данных в разделе 4.1. На сформированных районах заданы источники $S = \{S_1, S_2, S_3\}$ с координатами центров источников x_{si}, y_{si} $(i = 1, \dots, 3)$, 1 сток $D = D_1$ с координатами центра x_{d1}, y_{d1}, и промежуточные пункты $Q = \{Q_1, Q_2, Q_3\}$ с координатами центров $x_{qg}, y_{qg} = x_{sg}, y_{sg} (g =$

$1, \dots, 3$), то есть источники являются также промежуточными пунктами. Предполагается, что они расположены в деревнях или недалеко от производственных предприятий. Считается, что местность не является горной и высота местности для всех точек карты местности равна. Предполагается, что источники, промежуточные пункты, стоки способны обслуживать поддерживаемые типы транспортных средств, отправлять и принимать любые типы транспортных средств.

Задано множество грузов различных типов G. Каждый тип груза G_k характеризуется набором параметров GP_k, в которые входят сам тип груза g_{k1}, масса груза g_{k2}, стоимость груза g_{k3}. Предполагается, что грузы упакованы в коробки и каждый БПЛА может перевозить лишь одну коробку. Для каждого груза определена его масса вместе с упаковкой. Заданы стоимости грузов. Рассматриваются грузы четырех типов с заданным набором характеристик. Заданы запасы грузов в источниках T^S, и их потребности в стоке T^D. Считается, что все БПЛА A_1, A_2, A_3 располагаются в стоке D.

Задано время планирования в часах T. Предполагается, что в течение этого времени все доставки могут быть осуществлены при заданных условиях.

Будем обозначать сформированные наборы прогнозных индикаторов как $u_y^r, u_y^s, u_y^c, u_y^T$. Будем обозначать X_y^*- рациональные сценарии, обеспечивающие средний показатель стоимостной оценку отсутствия простоев БПЛА E_y^* Итак, проверяется, что разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП обеспечивает расчет рациональных сценариев транспортировки грузов X_y^* вместе с соответствующими им показателями стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА E_y^*.

Для реализации алгоритмов, входящих в состав разработанного алгоритмического обеспечения, предлагается использовать программную

среду Python 3. Полученные результаты эксперимента, соответствующие шагам 1-4 эксперимента, выводятся в таблично-графиковом описании.

Проведение эксперимента №1. Подготовка исходных данных. Метеорологическая статическая информация задана по аналогии с планируемыми в разделе 4.1 для эксперимента №1. Наборы данных отражены на Рис. В.3 – В.14. Остальные внутренние данные заданы в коде программы, написанной на языке Python [122] (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ присутствует в Приложении Г). Исходные данные БПЛА в эксперименте отражены в Табл. Д.1.

Высота полета: *H=100* (м).

Источники S с координатами центров источников x_{si}, y_{si} $(i = 1, \dots, 3)$, сток D с координатами центра x_{d1}, y_{d1}, и промежуточные пункты Q с координатами центров $x_{qg}, y_{qg} = x_{sg}, y_{sg} (g = 1, \dots, 3)$ заданы вручную.

Грузы G выбраны на основе статистики о спросе на основные товары, в котором нуждается человек и осуществляет покупки [128]. Характеристики грузов представлены в Табл. Д.2.

Запасы в источниках: $T^S = \begin{Vmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{Vmatrix}$.

Потребности в стоке: $T^D = \|2 \quad 2 \quad 2\|$.

Время планирования: *T=24*.

Построение маршрутных сетей. С применением алгоритма Флойда-Уоршелла формируется граф Г. который можно описать матрицей смежности $\Gamma^*_{4x4} = \left\| \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \right\|$.

Формируется матрица затрат $C = \|C_f(A_l, Y_p)\|$ с учетом скоростных характеристик БПЛА - максимальной крейсерской скорость v_{l1}, скорости взлета v_{l2} и скорости посадки v_{l3}, и длиной маршрута Γ_f, представленного расстоянием между его двумя точками с учетом взлета и посадки БПЛА при высоте *H* при помощи операций разработанной программы.

Применим разработанный алгоритм определения прогнозных индикаторов, представленный в разделе 3.1. Получим по 268 наборов значений прогнозных индикаторов для трёх районов (см. Рис. В.16 – В.27).

Далее, в соответствии с формулами (3.1), (3.2), (3.3), (3.5) вычислим индексы выполнения критериев для l-ых БПЛА как $f_i(A_l)(i = 1, \dots, 4)$, которые принимают значения 0 и 1, и сформируем прогнозные метеорологические ограничения U^* маршрутных сетей по формуле (3.6). Используем P_{min}=1, поскольку планируется полет, обладающий наибольшей надежностью с точки зрения отсутствия опасности тряски и обледенения при учете облачности.

Набор метеорологических ограничений маршрутной сети для трёх БПЛА в соответствующих районах представлены далее: для Москвы – на Рис. Д.1 – Д.3, для Петропавловска-Камчатского – на Рис. Д.4 - Д.6, для Архангельска – на Рис. Д.7 – Д.9.

Поиск рациональных сценариев транспортировки грузов и соответствующих показателей стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Применим алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам в отмеченных условиях при заданных найденных ранее 268 наборах метеорологических ограничений для каждого из районов. Будем применять алгоритмы The Clarke & Wright [59], Sweep [60], GGA [103], ACS [104]. Количество итераций и численность поколения/популяции соответственно для метаэвристических алгоритмов ACS и GGA считаем равными 100. Скорость мутации для GGA принимаем равным 0.01, а размер элитных особей для GGA – 20.

Результаты применения предложенного алгоритма распределения транспортных средств в эксперименте с учетом наборов прогнозных индикаторов $u_y^r, u_y^s, u_y^c, u_y^T$ для Москвы представлены на Рис. Д.10 - Д.13, для Петропавловска-Камчатского – на Рис. Д.14 – Д.17, для Архангельска – на Рис. Д.18 – Д.21.

Выводы из результатов эксперимента №1. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- предложенный алгоритм построения маршрутной сети, содержащийся в разработанном алгоритмическом обеспечении, работает в неблагоприятных условиях функционирования АМИП и строит маршрутные сети с прогнозными метеорологическими ограничениями;
- предложенный алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам, содержащийся в разработанном алгоритмическом обеспечении, работает при неблагоприятных условиях функционирования АМИП с учетом алгоритмов The Clarke&Wright [59], Sweep [60], GGA [103], ACS [104], находит рациональные сценарии транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА;
- разработанное алгоритмическое обеспечение работает при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, находит рациональные сценарии транспортировки грузов вместе с соответствующими показателями стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Таким образом, гипотеза №1 о том, что разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП обеспечивает расчет рационального сценария транспортировки грузов и соответствующего ему показателя стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА, верна.

Выдвижение гипотезы №2 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решения на стратегическом

уровне управления в части повышения при неблагоприятных условиях функционирования АМИП показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения.

Планирование эксперимента №2.

Предложим следующую последовательность проведения испытаний в эксперименте:

1) подготовка исходных данных;
2) построение маршрутных сетей с использованием разработанного и существующего алгоритма построения маршрутной сети;
3) поиск рациональных сценариев транспортировки грузов и соответствующих показателей стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА с использованием предложенного алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам сформированных маршрутных сетей на предыдущем шаге.

Количество испытаний – 1095.

Исходные данные эксперимента представляют собой расширенные данные эксперимента №1, но с поправкой, что метеорологическая информация формируется по аналогии с планируемым в разделе 4.1 для эксперимента №2, однако учитывается уникальность дат и поэтому общее число испытаний для каждого района 365.

Будем обозначать сформированные наборы прогнозных индикаторов как $u_y^r, u_y^s, u_y^c, u_y^T$. Будем обозначать $X_{1y}{}^*$- рациональные сценарии, обеспечивающие средний показатель стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА $E_{1y}{}^*$ и полученные с использованием разработанного алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам. В свою очередь, будем обозначать $X_{2y}{}^*$- рациональные сценарии, обеспечивающие средний показатель стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА $E_{2y}{}^*$ и полученные с использованием стандартного алгоритма распределения транспортных средств по маршрутам. Таким образом, проверяется, что

разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения неблагоприятных условиях функционирования АМИП показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА E_{1y}^{*} до 22.1% по сравнению с E_{2y}^{*}, полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения.

Для реализации алгоритмов, входящих в состав разработанного алгоритмического обеспечения, предлагается использовать программную среду Python 3. Полученные результаты эксперимента, соответствующие шагам 1-4 эксперимента, выводятся в таблично-графиковом описании.

Проведение эксперимента №2. Подготовка исходных данных. Метеорологическая статическая информация задана по аналогии с планируемыми в разделе 4.1 для эксперимента №2, но учитывается уникальность дат.

Исходные значения показателя «Индикатор дождя» за 2023 год в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. Д.22 – Д.24, показателя «Индикатор снега» - на Рис. Д.25 – Д.27, показателя «Индикатор облачности» - на Рис. Д.28 – Д.30, показателя «Индикатор температуры» - на Рис. Д.31 – Д.33.

Остальные внутренние данные заданы в коде программы, написанной на языке Python [122] (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ присутствует в Приложении В) и совпадают с заявленными в эксперименте №1.

Построение маршрутных сетей. Граф Г и матрица затрат C формируются с применением алгоритма Флойда-Уоршелла аналогично тому, как в эксперименте №1.

С использованием разработанного алгоритма определения прогнозных индикаторов, представленного в разделе 3.1, формируются по 365 наборов прогнозных значений.

Полученные значения прогнозного показателя «Индикатор дождя» в Москве, Петропавловске-Камчатском, Архангельске представлены на Рис. Д.34 – Д.36, прогнозного показателя «Индикатор снега» - на Рис. Д.37 – Д.39, прогнозного показателя «Индикатор облачности» - на Рис. Д.40 – Д.42, прогнозного показателя «Индикатор температуры» - на Рис. Д.43 – Д.45.

Далее, в соответствии с формулами (3.1), (3.2), (3.3), (3.5) вычислим индексы выполнения критериев для l-ых БПЛА как $f_i(A_l)(i = 1, \dots, 4)$, которые принимают значения 0 и 1, и сформируем прогнозные метеорологические ограничения U^* маршрутных сетей по формуле (3.6). Используем P_{min}=1, поскольку планируется полет, обладающий наибольшей надежностью с точки зрения отсутствия опасности тряски и обледенения при учете облачности.

Набор метеорологических ограничений маршрутной сети для трёх БПЛА в соответствующих районах представлены далее: для Москвы – на Рис. Д.46 – Д.48, для Петропавловска-Камчатского – на Рис. Д.49 - Д.51, для Архангельска – на Рис. Д.52 – Д.54.

Для существующего алгоритма построения маршрутной сети будем считать, что при неблагоприятных метеорологических условиях вылет невозможен, то есть значение в матрице метеорологических ограничений для всех БПЛА является нулевым.

Поиск рациональных сценариев транспортировки грузов и соответствующих показателей стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Применим предложенный алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам в отмеченных условиях при заданных найденных ранее 365 наборах метеорологических ограничений для каждого из районов. Будем применять алгоритмы The Clarke & Wright [59], Sweep [60], GGA [103], ACS [104]. Количество итераций и численность поколения/популяции

соответственно для метаэвристических алгоритмов ACS и GGA считаем равными 100. Скорость мутации для GGA принимаем равным 0.01, а размер элитных особей для GGA – 20.

Результаты применения предложенного алгоритма распределения транспортных средств для Москвы в эксперименте представлены на Рис. Д.55 - Д.58, для Петропавловска-Камчатского в эксперименте - на Рис. Д.59 - Д.62, для Архангельска - на Рис. Д.63 - Д.66.

Дополнительные результаты применения алгоритмов распределения транспортных средств для Москвы, Петропавловска-Камчатского и Архангельска в эксперименте с учетом наборов прогнозных индикаторов u_y^r, u_y^s, u_y^c, u_y^T представлены в Табл. Д.3 – Д.5.

Эффективность программы подтверждает также результат Акта внедрения, расположенный в Приложении Е. Внедрению подлежало разработанное алгоритмическое обеспечение, одной из функций которого являлся расчёт рационального сценария транспортировки грузов. Принятие решения о его внедрении было основано в том числе на результатах программной реализации соответствующего данной функции модуля в указанном НИР «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы на основе проведения летного эксперимента» (шифр отсутствует, № ГР 121112200279-8, заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского) [94].

Рассматривались 7 БПЛА двух типов – с повышенной (до 30 кг) и стандартной (до 10 кг) грузоподъемностью и моделировалось 7 полетов – по одному для каждого БПЛА. Граф маршрутов состоял из трёх вершин, длина ребер, соединяющих пары из них, составляла 500 м. Высота полета принималась равной 20 м. Были заданы эксплуатационно-технические и летно-технические характеристики БПЛА обоих типов. Параметры полетов, полученные в результате проведенного моделирования, содержали сведения о номерах полетов, типах проводимых БПЛА операций (взлет, посадка,

зависание, полет по прямой с учетом узлов графа), типах БПЛА, а также длительности моделируемых операций в секундах.

Обработка и анализ результатов эксперимента №2. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- из Рис. Д.55 - Д.58 и Табл. Д.3, следует, что применение разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП для района вблизи Москвы позволяет улучшить поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения показателя средней стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА на 24.5% при уменьшении дисперсии на 16.6% по сравнению со стандартным алгоритмическим обеспечением;
- из Рис. Д.59 - Д.62 и Табл. Д.4, следует, что применение разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП для района вблизи Петропавловска-Камчатского позволяет улучшить поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА на 21.3% при уменьшении дисперсии до 27.4% по сравнению со стандартным алгоритмическим обеспечением;
- из Рис. Д.63 - Д.66 и Табл. Д.5, следует, что применение разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации в неблагоприятных условиях функционирования АМИП для района вблизи Архангельска позволяет улучшить поддержку принятия решения на стратегическом

уровне управления в части повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА на 20.7% при уменьшении дисперсии на 19.0% по сравнению со стандартным алгоритмическим обеспечением.

Определим средние показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА для разработанного и стандартного алгоритмического обеспечения (см. Табл. 4.2).

Таблица 4.2 - Результаты эксперимента №2

Алгоритмическое обеспечение	**E_1^*, руб.**
Разработанное алгоритмическое обеспечение	768.04
Стандартное алгоритмическое обеспечение	628.73

Из Табл. 4.2 следует, что разработанное алгоритмическое обеспечение улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения при неблагоприятных условиях функционирования АМИП показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения. Однако, несмотря на такое высокое значение, важно определить процент случаев, при которых возникали прогнозные метеорологические ограничения равные 1, влияющие на появление новых рациональных сценариев транспортировки грузов вместе с показателями стоимостных оценок отсутствия простоев всех БПЛА, а также статистически доказать значимость полученных результатов.

Процент случаев равен 1.83 и был вычислен на основе расчетов числа случаев, при которых прогнозные метеорологические ограничения были равны 1. Это можно заметить на Рис. Д.46, Рис. Д.51, Рис. Д.52, Рис. Д.54.

Значимость полученных результатов подтверждается статистически. Во-первых, значимыми являются сформированные метеорологические ограничения, поскольку репрезентативно получение прогнозных индикаторов, что было подтверждено в разделе 4.1. Во-вторых, итоговые показатели стоимостных оценок отсутствия простоев всех БПЛА обладают меньшей выборочной дисперсией, чем в существующем алгоритмическом обеспечении, при этом за исключением 1.83% случаев, в 98.17% случаев будут

выдавать решения, обладающие эффективной стоимостной оценкой эффективности отсутствия простоев всех БПЛА.

Таким образом, разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения при неблагоприятных условиях функционирования АМИП показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения.

4.3. Оценка результатов разработанного информационного обеспечения посредством проведения вычислительного эксперимента

В текущем разделе проводятся вычислительные эксперименты с целью подтверждения работоспособности и эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП в части повышения эффективности, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА для разработанного информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, описанного в разделах 2.1, 2.2 и 2.4.

Вначале проверим работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения, а затем его эффективность.

Выдвижение гипотезы №1 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации при неблагоприятных условиях функционирования АМИП

предоставляет информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Планирование эксперимента №1. Предложим следующую последовательность проведения испытаний:

1) подготовка исходных данных;
2) формирование лог-файлов, полученных на основе верифицированных расчетов;
3) симуляции полета.

Количество испытаний – 804.

Исходные внешние данные хранятся в БД БПЛА, БД Грузы, БД Миссии и БД Реконфигурации в соответствии с обозначенным в разделе 2.1.

Исходные внутренние данные соответствуют введенным в разделе 2.1 в Табл. 2.3 (кроме лог-файла, который не является исходным).

Реализация методов и средств формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, обозначенных в разделе 2.2, и предполагаемых на шагах эксперимента 1-3, предлагается посредством использования программного комплекса, состоящего из программных сред GAMA версии 1.8.2.-RC2 и Python 3. Обе платформы функционируют на Windows, Linux, MacOS (Intel), MacOS (Apple Silicon). GAMA используется для визуализации и симуляции транспортировки грузов гетерогенной группой БПЛА. Поиск рационального сценария транспортировки грузов и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА с использованием разработанного алгоритмического обеспечения, а также его запись вместе с оценками в отдельный файл, производится в Python. Рассмотренный файл может быть использован в GAMA для проведения симуляции.

Выбор программной среды GAMA определен следующими факторами: бесплатный доступ, успешное решение задач визуализации и симуляции

поведения агентов, под которыми в текущем случае могут выступать БПЛА, грузы, стоки, источники, промежуточные пункты, большой набор готовых модулей для легкого обучения и адаптирования информации под желаемые задачи [129].

Использование GAMA позволяет провести качественную визуализацию и симуляцию полета группы БПЛА для транспортировки грузов на основе данных, рассчитанных в Python, с использованием специальных средств отображения. При разработке программного обеспечения в GAMA можно учитывать следующие готовые модули: «Импорт SHP», «PNG иконки», «Эксперимент и симуляция», «Следование пути».

Частоту обновления симуляции задаем таким образом, чтобы обеспечить незначительно ускоренное отображение выполнения транспортировки грузов на карте местности.

Полученные результаты эксперимента описываются в виде таблиц и рисунков.

Проведение эксперимента №1. Подготовка исходных данных. Для реализации полного ввода исходных данных, визуализации и симуляции транспортировки грузов гетерогенной группой БПЛА написана программа в GAMA [130] (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ присутствует в Приложении В). Частота обновления симуляции равная 2, заданная через параметр «boost» позволяет добиться незначительно ускоренного отображения выполнения транспортировки грузов на карте местности.

Чтение данных в GAMA из файла, сформированного запуском программы в Python, позволяет реализовать ввод исходных данных. Работа вычислительного ядра, верификация результатов расчетов и формирование лог-файла считается уже проведенной ранее в Python.

Для работы вычислительного ядра в части обработки метеоинформации считывается статистическая метеорологическая информация о температуре, облачности, наличия дождя и снега в БД Реконфигурации.

Для работы вычислительного ядра в части расчета рационального сценария считываем следующие данные:

- множество, определяющее гетерогенную группу БПЛА. Каждое транспортное средство характеризуется набором параметров, в которые входят тип БПЛА, максимальная крейсерская скорость, скорость взлета и скорость посадки, максимальная грузоподъёмность, стоимость летного часа, первая характеристическая цифра кода IP, вторая характеристическая цифра кода IP, предельно допустимая высота полета, минимально допустимая рабочая температура, максимально допустимая рабочая температура. Информация задаётся в БД БПЛА в соответствии с введенным в разделе 4.2 и представленным в Табл. Д.1;
- высоту полета (в коде программа задаем равной 100 м);
- множество источников с координатами центров источников. Информация задаётся в БД Миссия по аналогии с представленным в разделе 4.2;
- множество стоков и координаты центров стоков. Информация задаётся в БД Миссия по аналогии с представленным в разделе 4.2;
- множество промежуточных пунктов и координаты центров промежуточных пунктов. Информация задаётся в БД Миссия по аналогии с представленным в разделе 4.2;
- множество грузов различных типов, где каждый тип груза характеризуется набором параметров, в которые входят сам тип груза, масса груза, стоимость груза. Информация задаётся в БД Грузы в соответствии с введенным в разделе 4.2 и представленным в Табл. Д.2;
- матрица, элементы которой задают величины запасов груза каждого типа в источниках. Информация формируется в БД Миссия в соответствии с представленным в разделе 4.2;
- матрица, элементы которой задают величины потребностей в грузах каждого типа в стоках. Информация задаётся в БД Миссия в соответствии с представленным в разделе 4.2;

– распределение БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам. Информация задаётся в соответствии с представленным в разделе 4.2 в БД БПЛА.

В коде программы определены данные для записи в лог файл: рациональный сценарий транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности отражены в Табл. Ж.1.

Карты местности для экспериментов представлены на Рис. Ж.1 – Ж.3.

Формирование лог-файлов, полученных на основе верифицированных расчетов. Для поиска рационального сценария транспортировки грузов и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА, а также его записи вместе с оценками в отдельный файл, применена программа, написанная на языке Python [129] (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ присутствует в Приложении В). Эта же программа использовалась при проведении эксперимента в разделе 4.2. В результате этого этапа сформированы 804 лог-файла (см. пример на Рис. Ж.4).

Внутри лог-файл содержит информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Пример, взятый для одного из лог-файлов, приведён на Рис. Ж.5.

Симуляции полета. Кнопкой 1 – кнопкой запуска симуляции, используемой в разработанном информационно-алгоритмическом обеспечении в эксперименте, будем считать встроенную кнопку запуска эксперимента в GAMA. Кнопкой 2 – кнопкой прерывания симуляции, используемой в разработанном информационном обеспечении в эксперименте, будем считать встроенную кнопку перезапуска эксперимента в GAMA.

Визуализация полета БПЛА осуществляется в соответствии с найденным рациональным планом транспортировки грузов, считанным из лог-файла. Объекты БПЛА считаются в GAMA агентами, обладающими заданными характеристиками, способными двигаться, изменяя положение своего изображения.

Запускается симуляция, после чего визуализируется и актуализируется маршрутная сеть за счет движения БПЛА трех типов при заданной неподвижной карте местности, стоках, источниках, промежуточных пунктах, и прогнозных индикаторах для найденного рационального сценария транспортировки грузов (см. пример на Рис. Ж.6).

Стоит отметить, что на Рис. Ж.6 в верхнем правом углу окна присутствуют изображения прогнозных индикаторов, что символизирует, что симуляция происходит в неблагоприятных условиях функционирования АМИП. Далее, произведем симуляцию 804 раза с целью подтверждения работоспособности разработанного информационного обеспечения.

Выводы эксперимента №1. Из полученных результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

- разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации предоставляет при неблагоприятных условиях функционирования АМИП информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА на этапе формирования лог-файла, полученных на основе верифицированных результатов расчетов вычислительного ядра, поскольку она хранится там в текстовом виде;
- разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации предоставляет при неблагоприятных условиях функционирования

АМИП информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов на этапе симуляции, так как визуализирует полет БПЛА в соответствии с вычисленным сценарием.

Значит, гипотеза №1 о том, что разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации при неблагоприятных условиях функционирования АМИП действительно предоставляет информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА, верна.

Выдвижение гипотезы №2 об исследуемом объекте. Выдвигается гипотеза о том, что разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Планирование эксперимента №2. Предложим следующую последовательность проведения испытаний:

1) подготовка исходных данных;
2) формирование лог-файлов, полученных на основе верифицированных расчетов;
3) симуляции полета.

Количество испытаний – 1095.

Исходные внешние данные хранятся в БД БПЛА, БД Грузы, БД Миссии в соответствии с обозначенным в текущем разделе для эксперимента №1. Для БД Реконфигурации, содержащей статистическую метеорологическую

информацию, происходит расширение данных, увеличение количества данных.

Исходные внутренние данные соответствуют введенным в текущем разделе для эксперимента №1.

Реализация методов и средств формирования, хранения, актуализации и предоставления информации для использования в автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации предлагается также посредством использования программного комплекса, состоящего из программных сред GAMA версии 1.8.2.-RC2 и Python 3. Их предназначение и порядок работы совпадает с описанным в текущем разделе для эксперимента №1.

Полученные результаты эксперимента описываются в виде таблиц и рисунков.

Проведение эксперимента №2. Подготовка исходных данных. Для реализации полного ввода исходных данных, визуализации и симуляции транспортировки грузов гетерогенной группой БПЛА написана используется та же программа в GAMA, что и в эксперименте №1. Частота обновления симуляции равна 2.

Для работы вычислительного ядра в части обработки метеоинформации считывается расширенная статистическая метеорологическая информация о температуре, облачности, наличия дождя и снега в БД Реконфигурации.

Остальная информация для работы вычислительного ядра в части расчета рационального сценария информация задается в соответствии с заявленной в эксперименте №1.

Изображения стоков, источников, промежуточных пунктов, БПЛА, ненулевых показателей индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности отражены в Табл. Ж.1.

Карты местности для экспериментов представлены на Рис. Ж.1 – Ж.3.

Формирование лог-файлов, полученных на основе верифицированных расчетов. Для поиска рационального сценария транспортировки грузов и показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА, а также его записи вместе с показателями в отдельный файл, применена программа, написанная на языке Python, также используемая в эксперименте №1 [129]. В результате этого этапа сформированы 1095 лог-файлов (см. пример на Рис. Ж.7).

Внутри лог-файл содержит информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА (формат записи аналогичен отмеченному в эксперименте №1).

Симуляции полета. Кнопкой 1 будем считать встроенную кнопку запуска эксперимента в GAMA. Кнопкой 2 – кнопкой прерывания симуляции, используемой в разработанном информационном обеспечении в эксперименте, будем считать встроенную кнопку перезапуска эксперимента в GAMA.

Визуализация полета БПЛА осуществляется в соответствии с найденным рациональным планом транспортировки грузов, считанным из лог-файла по аналогии с заявленным в эксперименте №1.

Отличие симуляции эксперимента №2 от симуляции эксперимента №1 заключается в том, что производится симуляция сценариев транспортировки грузов в большем количестве – 1095 раз с целью подтверждения эффективности разработанного информационного обеспечения. Эффективность программы GAMA подтверждает также результат Акта внедрения, расположенный в Приложении Е, в котором отмечено ускорение времени принятия решения, вызванное прежде всего оперативностью используемого в данном информационном обеспечении метода обработки метеорологической информации, который был также описан в разделе 2.3 и проверен на работоспособность и эффективность в разделе 4.1.

Внедрению подлежало работающее информационное обеспечение, одной из функций которого являлась визуализация и симуляция полета группы БПЛА по рассчитанному рациональному сценарию транспортировки грузов. Принятие решения о внедрении разработанного информационного обеспечения было основано в том числе на результатах программной реализации соответствующего данной функции модуля в указанном НИР «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы на основе проведения летного эксперимента» (шифр отсутствует, № ГР 121112200279-8, заказчик – НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского) [94].

Рассматривались 7 БПЛА двух типов – с повышенной (до 30 кг) и стандартной (до 10 кг) грузоподъемностью и моделировалось 7 полетов – по одному для каждого БПЛА. Граф маршрутов состоял из трёх вершин, длина ребер, соединяющих пары из них, составляла 500 м. Высота полета принималась равной 20 м. Были заданы эксплуатационно-технические и летно-технические характеристики БПЛА обоих типов.

При запуске симуляции информация отображалась в трех частях интерфейса GAMA: меню, консоли и окне симуляции. Меню позволяло регулировать информацию в случае, если заданные данные необходимо скорректировать, чтобы провести прогнозирование, а также для тестирования работы самой программы, то есть ее отладки. Среди регулируемых параметров были параметры карты, БПЛА обоих типов и перевозимого груза. Консоль была полезной для непрерывного отслеживания и не требовала загрузки дополнительных файлов после сохранения туда информации по выполнению транспортной задачи. Промежуточные выводимые сообщения в консоли содержали сведения о доставке и загрузке грузов для конкретных БПЛА в конкретный момент времени. Конечные выводимые сообщения в консоли содержали информацию о времени начала и окончания транспортной задачи и общей длительности её выполнения в секундах. Графическая часть в окне

симуляции представлена с использованием трех изображений: изображения БПЛА 1-го типа, 2-го типа и изображения посадочных зон (мест взлета/посадки). Изображение БПЛА 1-го типа и 2-го типа совпадали за исключением разницы в размерах. Параметры полетов, полученные в результате проведенного моделирования, содержали сведения о номерах полетов, типах проводимых БПЛА операций (взлет, посадка, зависание, полет по прямой с учетом узлов графа), типах БПЛА, а также длительности моделируемых операций в секундах.

Выводы из результатов эксперимента №2. Из полученных результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

- разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения при неблагоприятных условиях функционирования АМИП степени достоверности информации о рациональном сценарии транспортировки грузов, поскольку отображает информацию о рациональном сценарии транспортировки грузов в лог-файле в текстовом формате и на этапе симуляции, где визуализируется сценарий транспортировки грузов и могут быть отмечены ненулевые прогнозные индикаторы, в то время, как существующее информационное-обеспечение это сделать не может;
- разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения при неблагоприятных условиях функционирования АМИП степени достоверности информации о показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА, поскольку происходит её запись в текстовом формате в лог-файл, в то

время, как существующее информационное-обеспечение это сделать не может.

Следовательно, разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации действительно улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, выраженной степенью достоверности информации о рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Выводы по Главе 4

Проведена оценка результатов разработанного метода обработки метеорологической информации для АМИС. Описано планирование и проведение экспериментов, направленных на подтверждение его работоспособности и эффективности. Проведена обработка и анализ результатов экспериментов, подтверждающих, что разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в виде прогнозных индикаторов – индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности и индикатора температуры в оперативном режиме.

Проведена оценка результатов разработанного алгоритмического обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, содержащей алгоритмы, учитывающие неблагоприятные условия функционирования АМИП. Описано планирование и проведение экспериментов, направленных на подтверждение его работоспособности и эффективности. Проведена обработка и анализ

результатов экспериментов, показывающих, что разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации с алгоритмом построения маршрутной сети и алгоритмом распределения транспортных средств по маршрутам, работающими при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА для рассчитанного рационального сценария транспортировки грузов до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения.

Проведена оценка результатов разработанного информационного обеспечения автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Описано планирование и проведение экспериментов, направленных на подтверждение его работоспособности и эффективности. Проведена обработка и анализ результатов экспериментов, показывающие, что разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

Результаты данной Главы опубликованы в работах [110-122].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате исследования новые научно обоснованные решения, включающие метод обработки метеорологической информации, алгоритмическое и информационное обеспечение, являются значимыми для развития отрасли БПЛА, поскольку способны повысить эффективность применения групп БПЛА.

Достижение цели диссертационной работы — разработка и исследование автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации подкреплено следующими результатами:

1) Проведен анализ предметной области в части необходимости разработки автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. В результате проведенного анализа определены используемые для решения задачи оптимизации и планирования транспортировки грузов алгоритмы, упорядоченная по структуре и формам информация, методы и средства её формирования, актуализации и предоставления для использования в системе, а также описаны методы прогностической обработки метеорологической информации, необходимые для формирования прогнозных индикаторов дождя, индикаторов снега, индикаторов облачности, индикаторов температуры, также определены неблагоприятные условия функционирования АМИС.

2) Разработано информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Определена упорядоченная по структурам и формам информация для использования в системе в виде внутренних, внешних и моделируемых данных. Определены методы и средства ввода исходных данных, работы вычислительного ядра, верификации, формирования лог-файла, работы ядра визуализации/симуляции и вывода данных.

3) Разработан метод обработки метеорологической информации для АМИС, поддерживающий оперативную обработку информации при неблагоприятных условиях функционирования АМИС. Описана обработка метеорологической информации в благоприятных условиях функционирования АМИС, а также прогностическая обработка информации для каждой группы исходных данных с целью определения индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности, индикатора температура при неблагоприятных условиях.

4) Разработано алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Предложен алгоритм построения маршрутной сети с метеорологическими ограничениями маршрутной сети и алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам с реконфигурацией гетерогенной группы БПЛА при метеорологических ограничениях маршрутной сети, позволяющие найти рациональный сценарий транспортировки грузов вместе с показателем стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА, как в случае благоприятных условий функционирования АМИП, так и при неблагоприятных условиях.

5) Проведена апробация разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством вычислительных экспериментов. Результаты экспериментов показали работоспособность и эффективность разработок, а именно следующее. Разработанный метод обработки метеорологической информации для АМИС представляет в неблагоприятных условиях функционирования АМИС итоговые результаты обработки в виде прогнозных индикаторов – индикатора дождя, индикатора снега, индикатора облачности и индикатора температуры в оперативном режиме. Разработанное алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации с алгоритмом построения маршрутной сети и алгоритмом распределения транспортных средств по маршрутам,

работающими при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, улучшает поддержку принятия решения на стратегическом уровне управления в части повышения показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА для рассчитанного рационального сценария транспортировки грузов до 22.1% по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения. Разработанное информационное обеспечение автоматизированной ИС поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования АМИП, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Таким образом, в работе решены все поставленные задачи и достигнута цель исследования. Полученные результаты являются новыми и позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует следующим областям исследования паспорта специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы»:

п.6. Обеспечение информационных систем и процессов, применения информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления. Общие принципы и основы организации информационных служб и электронных библиотек;

п.7. Разработка методов обработки, группировки и аннотирования информации, в том числе, извлеченной из сети интернет, для систем поддержки принятия решений, интеллектуального поиска, анализа;

п.16. Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМИП — автоматизированная метеорологическая измерительная подсистема

АМИС — автоматизированная метеорологическая измерительная система

БАС — беспилотная авиационная система

БД — база данных

БПЛА — беспилотный летательный аппарат

ИС — информационная система

ИТС — интеллектуальная транспортная система

ACS — Ant Colony System

GGA — General Genetic Algorithm

MMIST — Mist Mobility Integrated Systems Technology

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р: официальный сайт. Программа «Цифровая экономика» – URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf (дата обращения: 20.10.2023).

2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Совет Безопасности Российской Федерации: официальный сайт. – URL: http://www.scrf.gov.ru/security/economic/document123/ (дата обращения: 20.10.2023).

3. Багинова В.В., Миротин Л.Б., Федоров Л.С., Левин С.Б. Транспортная логистика (логистический менеджмент на транспорте): монография. – М.: РУСАЙНС, 2018. – 156 с.

4. Багинова В.В., Федоров Л.С., Левин С.Б. Логистический бизнес: гармония затрат и результата // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 112–115.

5. Смехов А.А. Основы транспортной логистики: учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1995. – 197 с.

6. Шаров В.А. Формирование новой вертикали управления перевозочным процессом // Автоматизация, связь, информатика. – 2002. – N 2. – С. 3–5.

7. Бубнова Г.В., Левин Б.А. Цифровая логистика – инновационный механизм развития и эффективного функционирования транспортно-логистических систем и комплексов // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 72–78.

8. Бубнова Г.В., Куренков П.И., Некрасов А.Г. Цифровая логистика и безопасность цепей поставок // Логистика. – 2017. – № 7 (128). – С. 46–50.

9. Вакуленко С.П., Ларин О.Н., Левин С.Б. Теоретические аспекты механизмов взаимодействия в транспортных системах // Мир транспорта. – 2014. – № 6 (55). – С. 14–27.

10. Левин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Транспортные киберфизические системы // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 3. – С. 3–15.

11. Негреева В.В., Кузнецова Е.Д. Оптимизация логистической деятельности транспортно-экспедиторской фирмы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2016. – № 2. – С. 65–79.

12. Гапанович В.А., Розенберг И.Н. Основные направления интеллектуального развития железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 4. – С. 5–11.

13. Герами В.Д., Колик А.В. О концепции развития логистической системы пассажирского транспорта Москвы // VII Международная научно-практическая конференция. ИнжЭкон. – 2008. – С. 8–9.

14. Морозов В.Н. Повышать эффективность и слаженность работы // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 2. – С. 4–9.

15. Лавриненко П.А., Ромашина А.А., Степанов П.С., Чистяков П.А. Транспортная доступность как индикатор развития региона // Проблемы прогнозирования. – 2019. – № 6(177). – С. 136-146.

16. Гаджиева С.А., Курбанов С.К. Беспилотные летательные аппараты применение и перспективы их развития // Компьютерные технологии и моделирование в науке, технике, экономике, образовании и управлении: тенденции и развитие: материалы международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 140-142.

17. Александрой В.И., Винокуров В.Н. Беспилотные летательные аппараты на службе МЧС России // Инженерные технологии в сельском и лесном хозяйстве: материалы Всероссийской национальной научно-практической конференции. – 2020. – С. 97-99.

18. Алешина-Алексеева Е. Н. Беспилотные летательные аппараты: их роль при административном правонарушении и преступлении // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. – 2021. – № 1 (4). – С. 21-23.

19. Евтодьева М.Г., Целицкий С.В. Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства // Пути к миру и безопасности. – 2019. № 2 (57). – С. 104-111.

20. Иванкина Ю.В., Замудряков Ю.Г. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях диагностирования воздушных линий // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики: сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции. – 2020. – С. 132-135.

21. Картиничев А.Ю., Панфилова Е.В. Беспилотные летательные аппараты – новые технологии тушения пожаров // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 768-775.

22. Манухина В.П., Дехтярь Е.В., Садакова В.В. Беспилотные летательные аппараты с целью проверки состояния мостов // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки. материалы XI международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 146-148.

23. Подрезов Ю.В. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – М.: ВИНИТИ, 2019. – № 3. – С. 64-72.

24. Тайманова Г.К., Пак Р.Е. Беспилотные летательные аппараты для мониторинга нефтепроводов // International Scientific and Practical Conference World Science. – 2018. – Т.1. – №1 (29). – С. 42-43.

25. Медведев В.А., Прохоров В.М., Кукор Б.Л., Фрумкин А.П. Виртуальная транспортная логистика: учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 320 с.

26. Медведев В.А., Присяжнюк А.С. Информационные системы и технологии в логистике и управлении цепями поставок: учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 183 с.

27. Шуть В.Н., Персиа Л. Интеллектуальные робототехнические транспортные системы. − Брест: Издательство УО «БрГТУ», 2017. − 196 с.

28. Алефиренко В.М., Нгуен Ч.Ф. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для решения задач по доставке грузов на ограниченной территории // Глобус: технические науки. − 2019. − №3 (27).

29. Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Гаврилюк М.В. Основные научные подходы к разработке нештатных режимов управления ИТС // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 3 (81). – С. 24–27.

30. Ли Ц. Проблемы и перспективы развития российско-китайской трансграничной электронной коммерции // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 65–70.

31. Карх Д.А. Интегрированные распределительные центры: цифровые решения в логистической системе товародвижения // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2018. – № 6. – С. 113–122.

32. Официальный сайт компании Amazon (Prime Air). – URL: https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/node=8037720011 (дата обращения 23.10.2021).

33. Официальный сайт компании DHL. – URL: https://www.logistics.dhl.ru/ru-ru/home.html?locale=true (дата обращения 23.10.2021).

34. Официальный сайт компании UPS. – URL: https://www.ups.com/ru/ru/Home.page (дата обращения 23.10.2021).

35. Официальный сайт компании Skyway. – URL: https://skyway.com.ru/skyway-singapur.html (дата обращения 23.10.2021).

36. БАС-200: беспилотный вертолет. – URL: https://rostec.ru/media/news/bas-200-bespilotnyy-vertolet/ (дата обращения 23.10.2021).

37. Официальный сайт компании Zipline. – URL: https://flyzipline.com (дата обращения 23.10.2021).

38. Официальный сайт компании Matternet. – URL: https://mttr.net (дата обращения 23.10.2021).

39. Официальный сайт компании Kaman. БЛА K-Max. – URL: https://www.kaman.com/aerosystems/solutions/air-vehicles-mro/k-max (дата обращения 23.10.2021).

40. Официальный сайт компании Star-UAV. – URL: https://star-uav.com (дата обращения 23.10.2021).

41. Официальный сайт компании Mist Mobility Integrated Systems Technology. – URL: https://www.mmist.ca (дата обращения 25.10.2021).

42. ГОСТ Р 59853-2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.

43. Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. 2023. №3. С. 3-15.

44. Моисеев Д.В., Чинь В.М., Мозолев Л.А., Моисеева С.Г., Фам С.К. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера // Труды МАИ. – №. 79. – 2015. – С. 8.

45. Моисеев Д.В., Чинь В.М. Вычислительные аспекты и прикладное программное обеспечение оптимальной маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра // Вестник евразийской науки. – Т. 9, № 3 (40). – 2017. – С. 92.

46. Неретин Е.С., Пестов П.В. Перспективная система оптимизации маршрута полета группы беспилотных летательных аппаратов с учетом влияния динамических погодных условий // Сборник трудов XV Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного

технического колледжа. Иркутск, 08 декабря - 09 декабря 2022 г. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации». – 2023. – Т. 1. – С. 211-220.

47. Мартьяшкин А.Б. Методика восстановления поля ветра для метеорологического обеспечения беспилотной авиации при решении задач специального мониторинга // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Информатика: проблемы, методы, технологии» – 2021. – С. 1-5.

48. Малкин В.А., Рожков И.В., Санько А.А. Влияние ветровых возмущений и нелинейностей сервопривода на контур стабилизации высоты полета беспилотного летательного аппарата // Системный анализ и прикладная информатика. – №2. – 2019. – С. 23-30.

49. Санько А.А., Рожков И.В., Шейников А.А. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – № 1. – 2019. – С. 41-51.

50. Wang F., Yang H., Meng Q. A three-dimensional coverage path planning method for multi-UAV collaboration // 2023 30th International Conference on Geoinformatics. – 2023. – P. 1-6.

51. Huang C., Huang H., Savkin A. Integration of UAVs and Public Transportation Vehicles for Parcel Delivery // Autonomous Navigation and Deployment of UAVs for Communication, Surveillance and Delivery. – 2023. – P.195-251.

52. Liu F., Lu C., Gui L., Zhang Q., Tong X., Yuan M. Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances // arXiv:2303.04147. – 2023. – P. 1-67.

53. Hao W., Wu C., Lin S. Research on UAV path planning based on improved particle swarm algorithm with inertia weight // 2023 IEEE International

Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT). – 2023. – P. 738-741.

54. Li M., Sun P.-F, Jeon S-W, Zhao X., Jin H. Multi-UAV Path Planning with Genetic Algorithm // 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). – 2023. – P. 918-920.

55. Zhang H. Analysis and Prospect of Existing UAV Path Planning Algorithms // 2023 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control (PEEEC). – 2023. – P. 301-304.

56. Laporte G., Semet F. Classical heuristics for the capacitated VRP // The vehicle routing problem. – 2002. – P. 109–128.

57. Kosasih W., Ahmad, Salomon L., Febricky. Comparison study between nearest neighbor and farthest insert algorithms for solving VRP model using heuristic method approach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 1-8.

58. Irnich S., Toth P., Vigo D. The Family of Vehicle Routing: Problems // Problems, Methods, and Applications, Second Edition. – 2014. – P. 1-33.

59. Clarke G., Wright J.W. Scheduling of vehicles from a Central Depot to a Number of the Delivery Point // Operations Research. – 1964. – P. 568–581.

60. Hanafi R., Rusman M., Mardin F. Distribution Route Optimization of a Capacitated Vehicle Routing Problem by Sweep Algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – P. 1–6.

61. Kadar A., Masum A., Faruque M., Shahjalal M., Iqbal M., Sarker I. Solving the Vehicle Routing Problem using Genetic Algorithm // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2011. – P. 2.

62. Neogi A., Mounika S., Kalyani S., Sai S. A Comprehensive Study of Vehicle Routing Problem With Time Windows Using Ant Colony Optimization Techniques // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – №7. – 2018. – P. 80-85.

63. Приказ Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) "Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и

выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2008 № 12119)

64. ГОСТ Р 58712-2019 Автоматизированная метеорологическая измерительная система. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

65. Болелов Э.А. Комплексная аэродромная мобильная метеорологическая система // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Задачи, технологии и решения комплексной безопасности: сборник статей по материалам XV Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 113-117.

66. Медведев Д.А., Геращенко Л.А. Разработка автоматизированной системы обработки и формирования метеорологической информации // iPolytech Journal. – № 21. – 2017. – С. 58-64.

67. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Модель автоматизированной системы приема, обработки и передачи метеорологической информации // Вестник Воронежского государственного технического университета. – № 7(8). – 2021. – С. 34-38.

68. Стрелкина Е.В., Соколов О.А. Автоматизированная информационная система «Метеосервер» // Научный лидер. – № 35(133). – 2023. – С. 41-43.

69. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции: учеб. пособие. – СПб.: ФГБОУ «Российский государственный гидрометеорологический институт», 2016. – 170 с.

70. Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Рогозин Е.А., Страшко О.В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Т. 45, № 2. – 2018. – С. 125-139.

71. Raivi A., Asiful H., Alam M., Moh S. Drone Routing for Drone-Based Delivery Systems: A Review of Trajectory Planning, Charging, and Security // Sensors. – 2023. – P. 23.

72. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Погода и полеты самолетов и вертолетов – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1980. – 280 с.

73. Антохин Е.А., Панасенко Н.Н., Атакищев О.И., Чернова П.Д. Обеспечение безопасности испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения // Известия института инженерной физики. – № 2(52). – 2019. – С. 71-76.

74. Лазуткин А.В., Урванцев Р.А., Флоров А.В. Шинкевич М.В. Анализ статистических данных о полетах беспилотных летательных аппаратов серии SUPERCAM в сложных метеоусловиях для картографии и видеоразведки // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Сборник статей и докладов по материалам ежегодной научно-практической конференции. – 2016. – С. 268-272.

75. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – №. 2. – 2016. – С. 7-15.

76. Носов А.М., Савельев А.И., Вильянинов В.Н., Ромашова Ю.Е., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Янин А.П., Самохвалов И.М. Опыт транспортировки компонентов крови с применением беспилотного летательного аппарата // Медицина катастроф. – №3. 2022. – С. 65-69.

77. Мирсаева Н.А. Статистические методы долгосрочного прогноза погоды: учеб.-метод. пособие. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 21 с.

78. Батырева О.В., Вильфанд Р.М., Лукиянова Л.Е., Тищенко В.А. Прогноз хода аномалии температуры внутри месяца осредненный по территории. // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 8. – С. 27-36.

79. Тищенко В.А. Развитие схемы прогноза хода температуры в течение месяца на территории России. // Тр. Гидрометцентра России. – 2000. – № 333. – С. 53-61.

80. Аргучинцева А.В. Методы статистической обработки и анализа гидрологических наблюдений. – Иркутск: Изв-во Иркут. гос. ун-та. – 2007. – 105 с.

81. Арженовский С.В., Молчанов И.Н. Статистические методы прогнозирования. – Ростов н./Д. – 2001. – 74 с.

82. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд-во РГГМУ. – 2008. – 408 с.

83. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Статистические модели прогнозирования среднемесячной температуры и месячной суммы осадков в г. Перми // Географический вестник. – 2021. – №2(57). – С. 84–95.

84. Юдин М.И. Статистические методы в метеорологии // Труды ГГО. – 1974. – № 298. – 176 с.

85. Павлова Л.В., Романчева Н.И. Моделирование системы управления авиаперевозками // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» (НиКа). – 2016. – Т. 2. – С. 237–238.

86. Романенко В.А. Математические модели функционирования аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка. – Самара: Издательство «АсГард», 2010. – 244 с.

87. Бородин В.М. Оптимизация управления авиаперевозками. Часть 2. Моделирование оптимального управления авиаперевозками. – СПб.: Академия ГА, 1995. – 88 с.

88. Рублев В.В., Ларин О.Н. Перспективы развития региональных аэропортов ЦФО в условиях преодоления кризиса, вызванного негативным влиянием пандемии COVID-19 // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2021. – № 16-1. – С. 1079–1083.

89. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 584 с.

90. Kuhn H. The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. – 1955. – P. 83-97.

91. Козлов М.В., Костюк Ф.В., Сорокин С.В., Тюленев А.В. Решение задачи коммивояжера методом целочисленного линейного программирования с последовательным исключением подциклов: описание и алгоритмическая реализация // Advanced Sciences. – 2012. – №2. – С. 124-141.

92. Изотова Т.Ю. Обзор алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. № 19 – 2016. – С. 341-344.

93. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.

94. Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы: отчет о НИР / ИПУ РАН; рук. Р. В. Мещеряков; отв. исполн.: А. А. Захарова. Москва, 2021. 354 с.

95. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009. – 798 с.

96. Дюбуа Д., Прад А. Общий подход к определению индексов сравнения в теории нечетких множеств // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. – 1988. – С. 51–63.

97. Аверченков В.И., Лагерев А.В., Подвесовский А.Г. Представление и обработка нечеткой информации в многокритериальных моделях принятия решений для задач управления социально-экономическими системами // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – N 2 (34). – С. 97–104.

98. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Оптимизация решения задачи упаковки объектов // Прикладная информатика. – 2012. – № 4(40). – С. 55–62.

99. Манвелидзе А.Б. Расходы на эксплуатацию воздушных судов крупных американских авиаперевозчиков // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 4. – С. 72-91.

100. Богданов И.П. Формирование оптимальных маршрутов региональных пассажирских авиаперевозок // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2019. – № 113. – С. 1–20.

101. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms. – The MIT Press, 1998. – P. 2.

102. Waldner J. Nanocomputers and Swarm Intelligence. – John Wiley & Sons, Inc., 2008. – P. 225.

103. Jenkins A., Gupta V., Myrick A., Lenoir M. Variations of genetic algorithms // arXiv:1911.00490. – 2019. – P. 1-3.

104. Chu S., Roddick J., Pan J. Ant colony system with communication strategies // Information sciences. – Vol. 167(1-4). – 2004. – P. 63-76.

105. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология: учебное пособие для летного и диспетчерского состава ГА. – Екатеринбург.: Уральский УТЦ ГА, 2010. – 113 с.

106. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. // Труды ЦИП. – 1959. – № 74. – С. 3-18.

107. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Изд-во Института компьютерных исследований. – 2002. – 656 с.

108. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 261 с.

109. ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). – М.: Стандартинформ, 2019. – 36 с.

110. Мещеряков Р.В., Саломатин А.А., Сенчук Д.В. Алгоритм численных расчетов перемещения группы роботов при выполнении транспортных миссий // Известия Алтайского государственного университета. 2021. – №1(117). – С. 112-115.

111. Мещеряков Р.В., Саломатин А.А., Сенчук Д.В. Оптимизация задачи транспортировки грузов с использованием многоагентной авиационной системы / Труды 31-й Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (Санкт-Петербург, 2020). СПб.: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2020. – С. 89-94.

112. Мещеряков Р.В., Саломатин А.А., Сенчук Д.В., Широков А.С. Сценарий поиска, выявления и тушения пожара в лесном массиве // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. – Т. 8, № 4. – С. 1-10.

113. Саломатин А.А. Алгоритм группового управления БПЛА на основе функционально-векторного орграфа в задаче тушения пожаров / Труды 19-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2023, Воронеж). Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 567-572.

114. Саломатин А.А. Алгоритм оптимального группового управления БПЛА в задаче покраски наружных стен зданий / Труды 18-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2022, Челябинск). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – С. 157-162.

115. Саломатин А.А. Анализ структур систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА с учетом метеорологической информации // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – № 3. – 2024 – С. 92-101.

116. Саломатин А.А. Влияние метеорологических характеристик на полет беспилотного летательного аппарата // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024) : сборник научных трудов. – М.: ИПУ РАН. – 2024. – С. 1190-1193.

117. Саломатин А.А. Разработка метода управления беспилотной авиационной системой с учетом кода IP в задаче транспортировки грузов // Управление большими системами. – №110. – 2024. – С 149-180.

118. Саломатин А.А., Трефилов П.М., Смолин А.Л. Формирование информационной модели системы управления беспилотными летательными аппаратами / Материалы 17-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 13-й Молодёжной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» (Таганрог, 2022). – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. – С. 417-419.

119. Сенчук Д.В., Саломатин А.А. К вопросу о построении системы управления беспилотной авиационной системы / Труды 9-й Международной научно-технической и научно-методической конференции "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании" (Санкт-Петербург, 2020). – СПб.: СПбГУТ, 2020. – Т. 2. – С. 561-565.

120. Meshcheryakov R.V., Salomatin A.A., Senchuk D.V., Shirokov A.S. Scenario of Search, Detection, and Control of Invasive Plant Species Using Unmanned Aircraft Systems / Agriculture Digitalization and Organic Production. – St. Petersburg, Russia: Springer Singapore, 2021. – P. 259-270.

121. Salomatin A.A., Podvesovskiy A.G., Smolin A.L. Formation of Unmanned Aerial Vehicle Link Configuration in the Problem of Cargo Transportation Scenario Selection Using Geospatial Data // Geocontext. – 2021. Vol. 9, № 1. – P. 5-16.

122. Shirokov A.S., Salomatin A.A., Galin R.R., Zorin V.A. Modeling of Joint Motion Planning of Group of Mobile Robots and Unmanned Aerial Vehicle / Frontiers in Robotics and Electromechanics. – Singapore: Springer, 2023. – P. 163-177.

123. Официальный сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – URL: https://meteoinfo.ru/ (дата обращения: 02.02.2024).

124. Крылов А.Д., Бакович М.Н. Беспилотные летательные аппараты: правовое регулирование // Межвузовский сборник научных трудов. – Краснодар, 2019. – С. 254-257.

125. Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 N 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – Собрание законодательства РФ. – 21.06.23.

126. Медяков Т.С. Особенности административно-правового регулирования использования беспилотных летательных аппаратов в России и зарубежных странах // Сборник материалов Всероссийского научно-практического семинара. – Рязань: Академия ФСИН России, 2017. – С. 190-198.

127. Оготоев К.С., Смирнов Н.А. Военные беспилотные летательные аппараты и международное право // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. – 2019. – С. 269-271.

128. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 29.12.2023).

129. Taillandier P., Gaudou B., Grignard A. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform // Geoinformatics. – 2019. – Vol. 23(2). – P. 299–322.

130. Саломатин А.А. Программа для поиска эффективного распределения транспортных средств по маршрутам с учетом метеорологических характеристик: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617778 РФ; Зарег. 04.04.2024.

131. Саломатин А.А. Программа для визуализации транспортировки грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов с учетом метеорологических характеристик: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617755 РФ; Зарег. 04.04.2024.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справочные материалы (таблицы)

Таблица А.1 - Типы БПЛА

Тип БПЛА	Преимущества	Недостатки	Примеры
Одноротorный вертолет	Вертикальный взлёт и посадка, полёт в режиме зависания, большая грузоподъёмность	Конструктивная сложность, опасность, исходящая от вращения большого ротора, высокая стоимость	DJI «Mavic Pro Platinum», Yuneec Typhoon H Professional, DJI «Agras MG-1P»
Мультироторный вертолет	Вертикальный взлёт и посадка, полёт в режиме зависания, высокая манёвренность, простота конструкции, операции в небольших помещениях и на открытом воздухе	Ограниченная грузоподъёмность, короткое время полёта	Airbus VSR700, Veronte Helicopter
Самолет с фиксированным крылом	Высокая скорость полёта Большая грузоподъёмность Большая зона действия	Необходимость взлетно-посадочной полосы, невозможность полёта в режиме зависания	Phoenix 2 компании Sentera, FeiyuTech
Гибридная комбинация	Вертикальный взлёт и посадка, полёт в режиме зависания, большая зона действия	Конструктивная сложность, находится в процессе разработки	Vtol, X PlusOne, Airbus «Zelator 28»

Таблица А.2 - Алгоритмы поиска кратчайшего пути на графах

Алгоритм	Вычислительная сложность по времени	Веса ребер графа	Количество вершин графа	Другая значимая особенность применения
Алгоритм Дейкстры	$O(n^2 + m)$	Положительные	Небольшое	Простота реализации
Алгоритм Беллмана-Форда	$O(n * m)$	Любого знака	Небольшое	-
Алгоритм поиска A*	$O(\log(h(x))$, где $h(x)$ – эвристическая оценка расстояния от рассматриваемой вершины к конечной	Любого знака	Небольшое	Необходимость задания эвристической оценки
Алгоритм Флойда-Уоршелла	$O(n^3)$	Любого знака	Небольшое	Способность находить

Алгоритм	Вычислительная сложность по времени	Веса ребер графа	Количество вершин графа	Другая значимая особенность применения
				отрицательные циклы
Алгоритм Ли волновой	$O(n^2)$	Любого знака	Любое (в том числе большое)	Возможность неточного решения при большом числе вершин графа (в связи с удалением части исходных ребер графа)

Таблица А.3 - Характеристики Венгерского алгоритма и метода потенциалов

Алгоритм/метод	Вычислительная сложность по времени	Особенности применения
Венгерский алгоритм	$O(m^4)$	Прост в использовании и хорошо проявляет себя при любом числе вершин
Метод потенциалов	$O(m^3)$	Прост в использовании и хорошо проявляет себя при небольшом числе вершин

Таблица А.4 - Условия применения алгоритмов для синтеза обобщенных оценок предпочтительности альтернатив

Алгоритмы	Условия применения
Алгоритмы с применением мультипликативной или аддитивной свертки	Все требования ЛПР должны выполняться и обладают равной важностью
Алгоритмы с применением взвешенных мультипликативных и аддитивных сверток	Все требования ЛПР должны выполняться и не обладают равной важностью
Алгоритмы, использующие нечеткие квантификаторы	Планируется, что искомая альтернатива должна иметь более высокую оценку по большинству критериев

Таблица А.5 - Характеристики алгоритмов целочисленной оптимизации

Алгоритмы	Преимущества	Недостатки
Алгоритм Гомори	Сходимость к глобальному оптимальному решению	Низкая скорость сходимости, значительное накопление ошибок

Алгоритмы	Преимущества	Недостатки
Методы ветвей и границ	Сходимость к глобальному оптимальному решению, незначительное накопление ошибок, высокая вероятность целочисленного решения при принудительной остановке	Невозможность оценить число решаемых задач, отсутствие признака оптимальности
Табу-поиск	Высокая эффективность при точном исследовании итерационных задач; избегает локальных оптимальных решений	Плохо работает в задачах большой размерности; необходимо использование дополнительных алгоритмов для эффективной работы в виду отсутствия памяти
Алгоритм имитации отжига	Сходится к глобальному оптимальному решению	Требует улучшений для эффективного функционирования
Генетические алгоритмы	Легче позволяют учитывать априорные знания, менее жесткие требования к применению, концептуально просты, широкая применимость	Очень затратная оценка функции приспособленности при задаче высокой размерности, плохая масштабируемость, индивидуальное условие остановки под каждую задачу, часто не сводится к глобальному оптимуму
Муравьиные алгоритмы	Небольшая подверженность неоптимальным начальным решениям, широкая применимость	Гарантированная сходимость, но неопределенность времени сходимости, часто приходится дополнять применением других методов, сильно зависят от настроенных параметров

Таблица А.6 - Характеристики алгоритмов при распределении транспортных средств по маршрутам

Алгоритмы	Преимущества	Недостатки
Алгоритмы с конструктивными эвристиками [56, 57, 83]	Обычно дают быстрое решение, легко реализуются при различных ограничениях в задаче	Часто имеют отставание от оптимального решения
Алгоритмы с эвристиками улучшения [56, 58, 83]	Эффективны при определении локального оптимального решения	Могут не обеспечить глобальное оптимальное решение, попадая в локальное; зависимость от начальной точки локального поиска
Алгоритмы с метаэвристиками [52, 56-58]	Слабо или полностью не зависит от ограничений задачи, высокая	Высокая вычислительная сложность

Алгоритмы	Преимущества	Недостатки
	точность решения (часто глобальное оптимальное решение)	

Таблица А.7 - Предназначение датчиков АМИС «Погода»

Датчик	Предназначение
Датчик температуры и относительной влажности воздуха	Непрерывное измерение влажности и температуры воздуха неагрессивных газовых сред и передачи данной информации в центральное устройство
Датчик температуры почвы	Измерение температуры на различных уровнях под землей
Датчик атмосферного давления	Измерение атмосферного давления
Анемометр (датчик скорости ветра)	Измерение скорости воздушного потока
Флюгер (датчик направления ветра)	Измерение направления воздушного потока
Пиранометр (датчик солнечной радиации)	Измерение суммарной солнечной радиации
Датчик высоты нижней границы облаков	Измерение высоты нижней границы облаков

Таблица А.8 - Особенности измерительных каналов АМИС «Погода»

Измерительный канал	Особенности
Измерительный канал параметров ветра	Сигналы поступают через промежуточный преобразователь и формируются в виде цифровых сигналов. На выходе: средняя скорость ветра, направление ветра за истекшие 10 мин (истекший период осреднения), максимальная скорость ветра за истекшие 10 мин, максимальная скорость за 3 ч
Измерительный канал температуры и влажности воздуха	Сигналы поступают через первичные измерительные преобразователи. На выходе: температура воздуха, осредненная за истекшую минуту, температура точки росы, относительная влажность воздуха, парциальное давление водяного пара, дефицит насыщения водяного пара
Измерительный канал атмосферного давления	Сигналы поступают от первичных преобразователей атмосферного давления или барометра. На выходе: атмосферное давление, приведенное к уровню моря, величина барической тенденции, характеристика барической тенденции в цифрах кода
Измерительный канал температуры поверхности	Сигналы поступают от промежуточного измерительного преобразователя в цифровом виде. На выходе: значение температуры поверхности; минимальные и максимальные значения температуры поверхности за истекшие 3 ч.

Измерительный канал	Особенности
Измерительный канал температуры почвы	Сигналы поступают от первичных преобразователей температуры, установленных на глубинах (5, 10, 15, 20, 40, 80, 120, 240, 320 см от поверхности земли) в цифровом виде. На выходе: температуры на глубинах; средние за сутки значения температуры почвы на глубинах
Измерительный канал количества осадков	Сигналы поступают от первичного измерительного преобразователя осадков в цифровом виде. На выходе: количество осадков в мм. за прошедшие 12 ч, соответствующие ночной или дневной половине суток
Измерительный канал видимости	Сигналы поступают от датчика метеорологической оптической дальности. На выходе: информация в кодовой форме о метеорологической дальности видимости
Измерительный канал облачности	Сигналы поступают от датчика высоты нижней границы облаков в цифровом виде. На выходе: второй минимум высоты нижней границы облаков за истекшие 15 секунд

Таблица А.9 - Измеряемые метеопараметры и их желательная с точки зрения эксплуатации точность

Измеряемый метеопараметр	Желательная с точки зрения эксплуатации точность
Средняя величина приземного ветра	Направление: ±10° Скорость: ±0,5 м/с до 5 м/с ±10% свыше 5 м/с
Отклонения от средней величины приземного ветра (порывы)	±1 м/с с учетом продольных и боковых составляющих
Видимость Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе	±50 м до 600 м ±10% в интервале 600-1500м ±20% свыше 1500 м ±10 м до 400 м ±25 м в интервале 400-800 м ±10% свыше 800 м
Наличие особых явлений погоды (из прогнозируемости)	не менее 80%
Количество облаков, значимых для полета	±1 октант (1/8 небосвода)
Высота нижней границы облаков, значимых для полета	±10 м до 100 м ±10% свыше 100 м

Измеряемый метеопараметр	Желательная с точки зрения эксплуатации точность
Температура воздуха и точки росы	±1°C
Давление (QNH, QFE)	±0,5 гПа

Таблица А.10 - Диапазон высот нижней границы облаков разных типов

Номер типа облака	Тип облака	Минимальная высота нижней границы, км	Максимальная высота нижней границы, км
1	Ci	7.0	18.0
2	Cs	6.0	8.0
3	Ac	2.0	6.0
4	As	3.0	5.0
5	Sc	0.6	1.5
6	St	0.1	0.7
7	Ns	0.1	1.0
8	Cu	0.8	1.5
9	Cb	0.4	2.0

Таблица А.11 - Группы методов статистического прогнозирования погоды и их особенности

Методы	Особенности применения
Статистические методы	Причинно-следственные-связи метеорологических процессов не установлены. Используются прогностические возможности различных циклов и периодичностей во временных рядах. Предикторы – метеорологические величины
Физико-статистические методы	Причинно-следственные связи между аномалиями погоды и влияющими факторами установлены. Предикторы – либо качественные соображения, либо гидродинамические уравнения, описывающие физику формирования прогнозируемого метеорологического элемента.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Вспомогательные материалы к Главе 2 и Главе 3

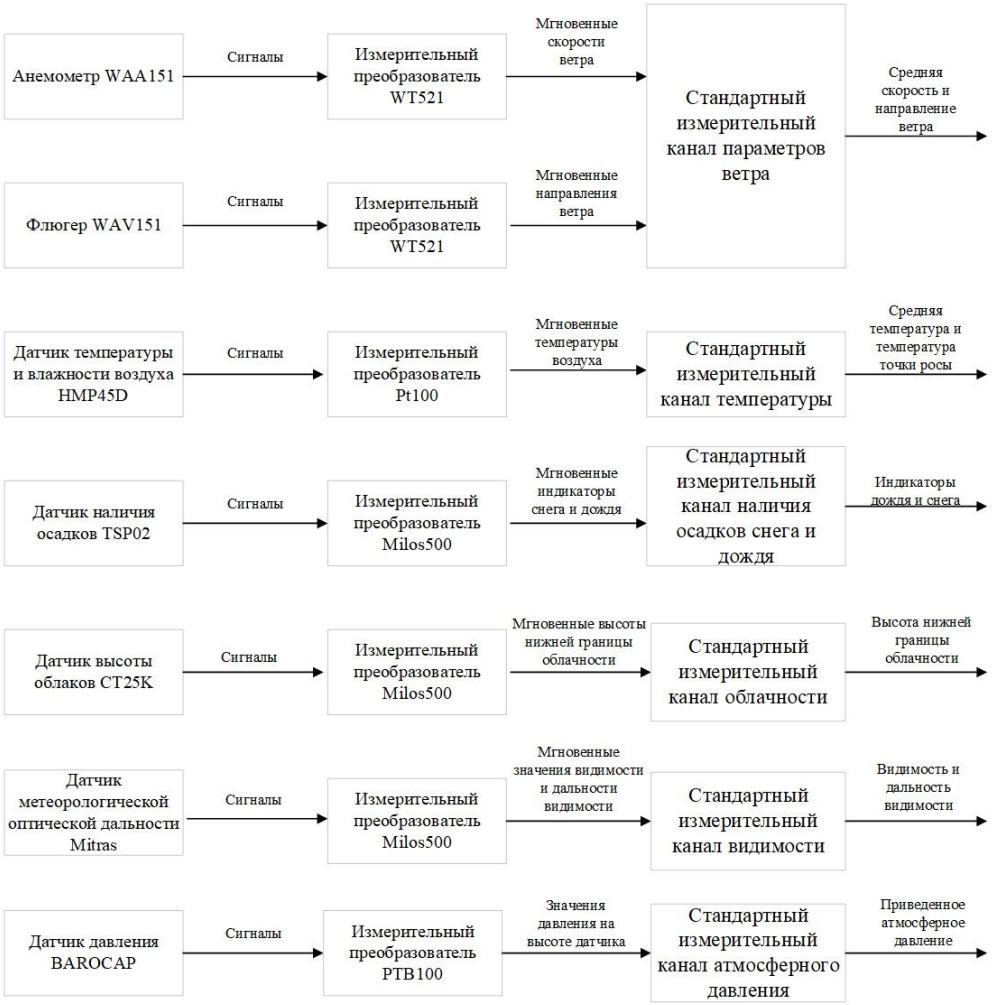


Рисунок Б.1. Общая структурная схема существующего АМИП

Рисунок Б.2. Общая структурная схема разработанного информационного обеспечения АМИП

Рисунок Б.3. Общая логическая модель для набора методов и средств в существующем информационном обеспечении

Таблица Б.1 - Расширенная таблица групп данных в разработанном информационном обеспечении

Информация	**Группа данных, содержащая информацию**	**Характеристики группы данных**
Информация о системе управления БПЛА	Данные системы управления БПЛА	Время планирования транспортных потоков (в)
Информация о размещении объектов	Данные размещения объектов	Места дислокации стоков, источников и промежуточных пунктов (в)
Информация о перевозимых грузах	Данные перевозимых грузов	Масса, тип (определяет конкретный набор размеров, форм, свойств, видов для груза), стоимость груза (в)
Информация об используемых БПЛА	Данные используемых БПЛА	Средняя скорость доставки грузов (р)

Информация	**Группа данных, содержащая информацию**	**Характеристики группы данных**
Информация об эксплуатационно-технических данных группы БПЛА	Эксплуатационно-технические данные БПЛА	Технические характеристики как грузоподъёмность (в), максимальная крейсерская скорость (в), скорость взлета (в) и посадки (в), предельная допустимая высота полета (в), диапазон рабочих температур (в), код IP (в)
Информация об общих исходных данных группы БПЛА	Общие исходные данные БПЛА	Средняя скорость доставки грузов (в), показатель стоимостной оценки отсутствия простоев (в)
Информация об экономических исходных данных БПЛА	Экономические исходные данные БПЛА	Стоимость летного часа (в)
Информация о данных маршрутной сети	Данные маршрутной сети	Геопространственные данные (в)
Метеорологическая информация	Метеорологические данные	Статистическая информация о метеорологических изменениях в наличии снега (в), дождя (в), облачности (в), температуры (в), прогнозные индикаторы дождя (р), снега (р), облачности (р) и температуры (р), средняя скорость (р), среднее направление ветра (р), средняя высота нижней границы облачности (р), видимость (р), дальность видимости (р), приведенное атмосферное давление (р)

Таблица Б.2 - Расширенная таблица БД в разработанном информационном обеспечении

Информация	**Структура данных, содержащая информацию**	**Данные**
Информация о гетерогенной группе БПЛА	БД БПЛА	Технические характеристики как грузоподъёмность, максимальная крейсерская скорость, скорость взлета и посадки, предельная допустимая высота полета, диапазон рабочих температур, код IP, стоимость летного часа

Информация	**Структура данных, содержащая информацию**	**Данные**
Информация о миссиях	БД Миссии	Множество источников, стоков, промежуточных пунктов с координатами центров источников, запасы грузов каждого типа в источниках, потребности грузов каждого типа в стоках
Информация о грузах	БД Грузы	Масса, тип, стоимость груза
Метеорологическая информация для реконфигурации гетерогенной группы БПЛА при прогнозных метеорологических ограничениях маршрутной сети	БД Реконфигурация	Метеорологическая информация о изменениях наличии снега, дождя, облачности, температуры, параметров ветра, параметров видимости, давления

Таблица Б.3 - Используемая информация разработанного метода обработки метеоинформации

Наименование	**Обозначение**	**Тип данных**	**Оценочный объем**
Мгновенные скорости ветра	u_k^v	числовой	15
Мгновенные направления ветра	u_k^w	числовой	15
Мгновенные температуры воздуха (в случае благоприятных условий)	u_k^T	числовой	60
Мгновенные индикаторы дождя (в случае благоприятных условий)	u_k^r	числовой	15
Мгновенные индикаторы снега (в случае благоприятных условий)	u_k^s	числовой	15
Мгновенные высоты нижней	u_k^c	числовой	15

Наименование	Обозначение	Тип данных	Оценочный объем
границы облачности (в случае благоприятных условий)			
Мгновенные значения видимости	u_k^q	числовой	60
Мгновенные значения дальности видимости	u_k^z	числовой	60
Значения давления на высоте датчика Количество моментов времени	u_k^p n	числовой числовой	15 1
Столбец «Номер»	i	числовой	n
Столбец «Время (дата)»	t_i	текстовый	n
Столбец «Явления»	e_i	текстовый	n
Столбец «Облачность»	c_i	текстовый	n
Столбец «Температура»	T_i	числовой	n

Таблица Б.4 - Результативная информация разработанного метода обработки метеоинформации

Наименование	Обозначение	Тип данных	Оценочный объем
Средняя скорость ветра	u^v	числовой	1
Среднее направление ветра	u^w	числовой	1
Средняя видимость	u^q	числовой	1
Средняя дальность видимости	u^z	числовой	1
Приведенное давление	u^p	числовой	1
Индикатор дождя	u^r	числовой	1
Индикатор снега	u^s	числовой	1
Высота нижней границы облачности/индикатор	u^c	числовой	1

Наименование	Обозначение	Тип данных	Оценочный объем
облачности (в зависимости от условий)			
Средняя температура/индикатор температуры (в зависимости от условий)	u^T	числовой	1

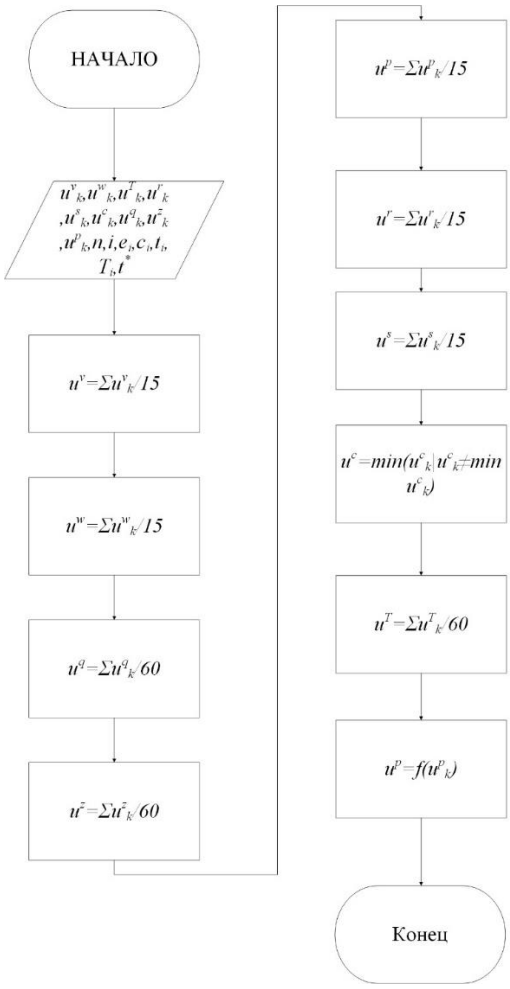


Рисунок Б.4. Общая схема для расчета метеоданных в благоприятных условиях

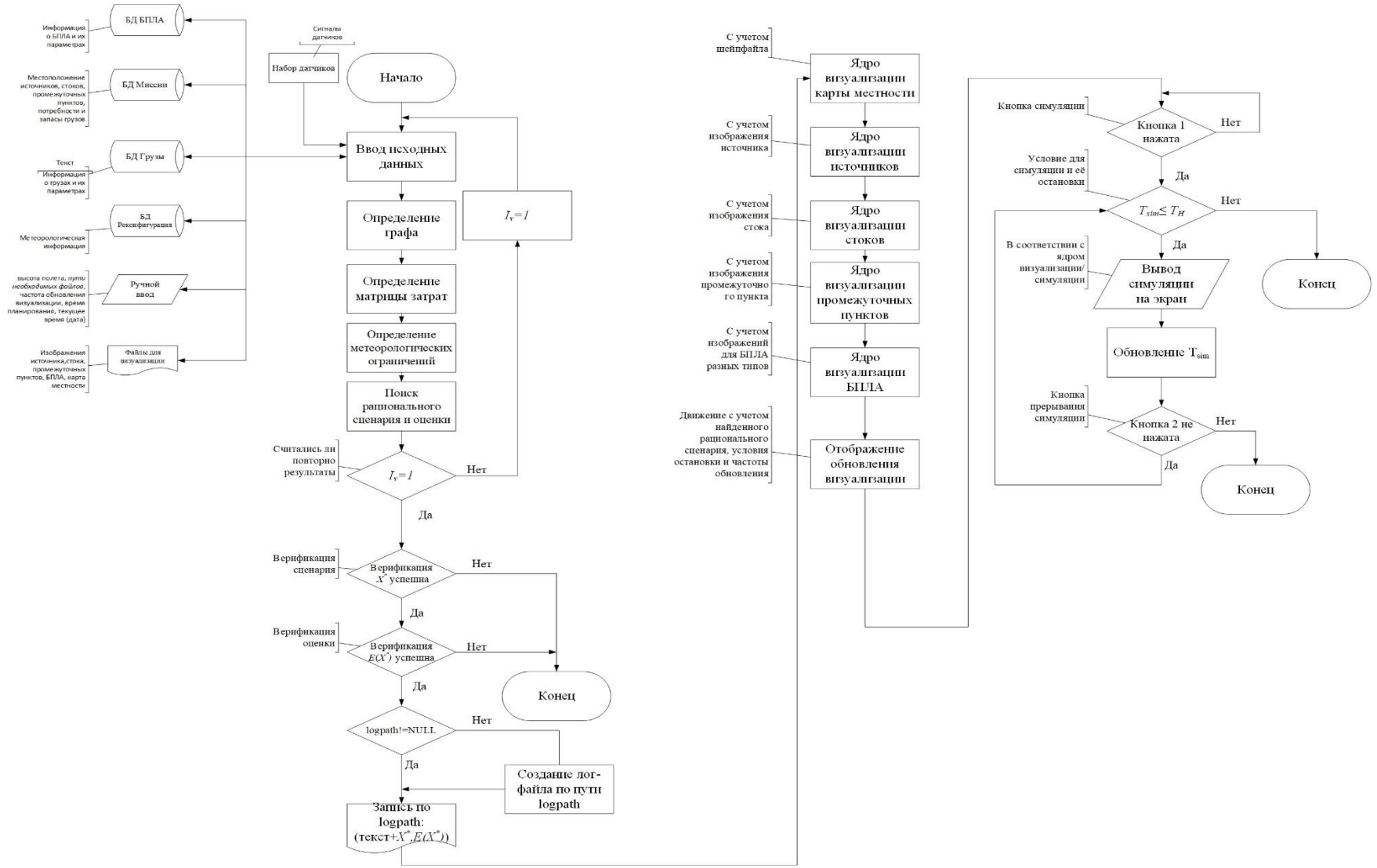


Рисунок Б.5. Логическая схема для разработанного и существующего информационного обеспечения в благоприятных условиях функционирования АМИП

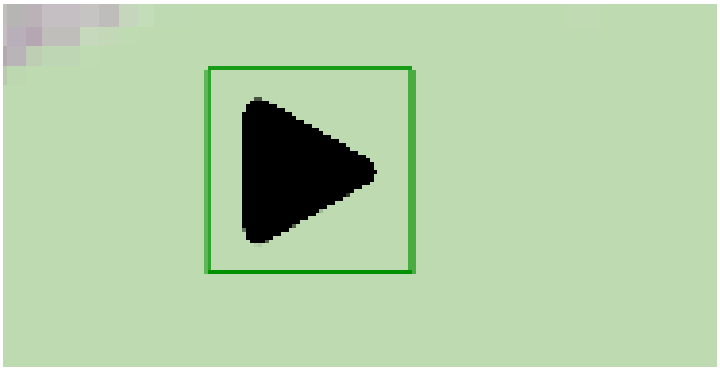


Рисунок Б.6. Визуализация выбора БПЛА

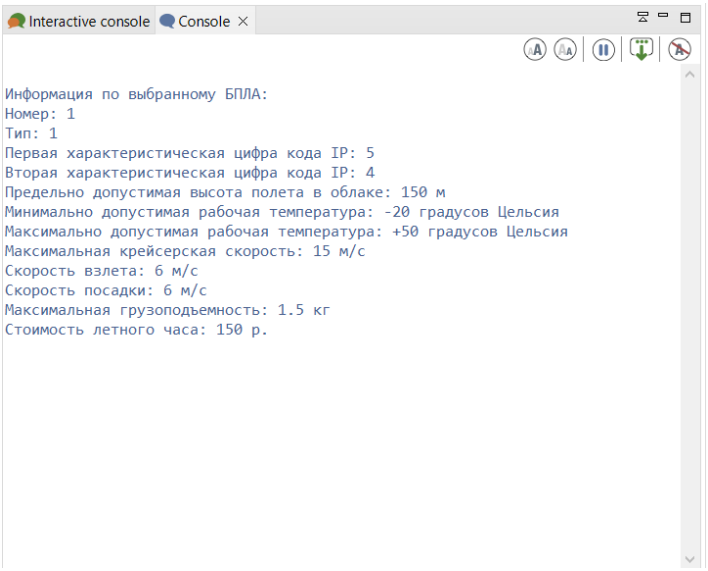


Рисунок Б.7. Вывод характеристик выбранного БПЛА

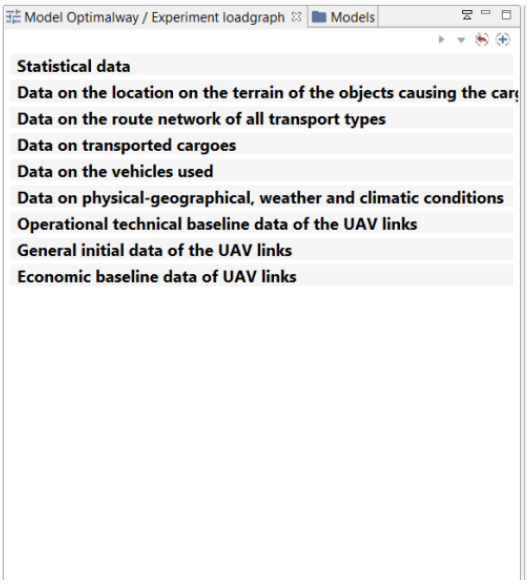


Рисунок Б.8. Пример меню регулирования параметров, влияющих на визуализацию и симуляцию

Рисунок Б.9. Общая логическая схема существующего алгоритмического обеспечения

Рисунок Б.10. Общая логическая схема разработанного алгоритмического обеспечения

Таблица Б.5 - Оценки вероятностей вывода из строя в связи с тряской в различных типах облаков

Описание	**Оценка вероятности вывода из строя в связи с тряской**
«отсутствует»	0.00
«отсутствует или слабая»	0.05
«слабая»	0.10
«слабая или умеренная»	0.30
«умеренная»	0.50
«умеренная или сильная»	0.60

Описание	Оценка вероятности вывода из строя в связи с тряской
«сильная»	0.70
«сильная или опасная»	0.85
«опасная»	1.00

Таблица Б.6 - Оценки вероятностей вывода из строя в связи с обледенением в различных типах облаков

Описание	Оценка вероятности вывода из строя в связи с обледенением
«отсутствует» «отсутствует или слабая»	0.00 0.05
«слабая»	0.10
«слабая или умеренная»	0.30
«умеренная»	0.50
«умеренная или сильная»	0.60
«сильная»	0.70
«сильная или опасная»	0.85
«опасная»	1.00

Рисунок Б.11. Общая логическая схема для разработанного алгоритма определения метеорологических ограничений маршрутной сети

Рисунок Б.12. Детальная логическая схема существующего алгоритма построения маршрутной сети в благоприятных условиях

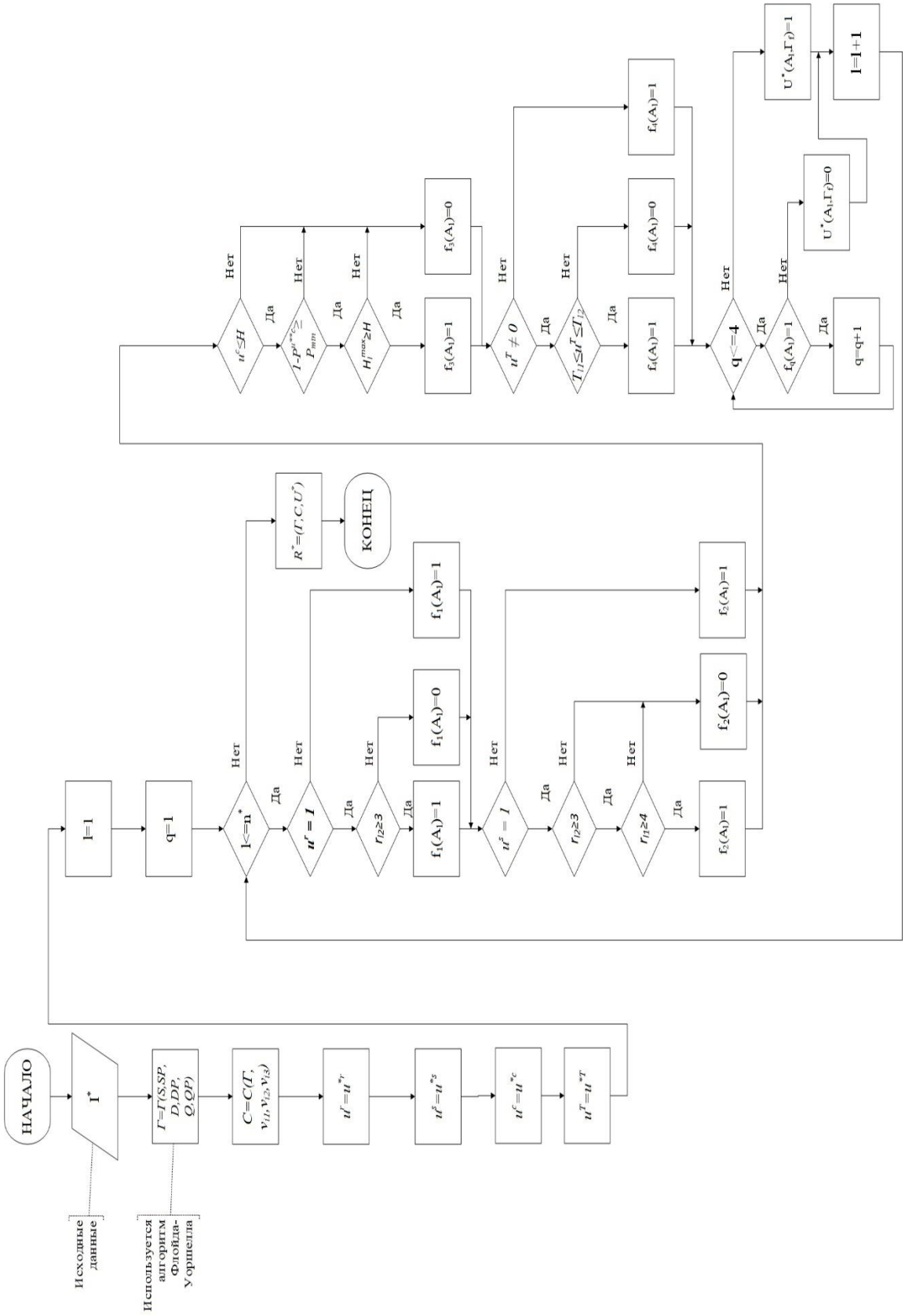


Рисунок Б.13. Детальная схема существующего алгоритма построения маршрутной сети в благоприятных условиях

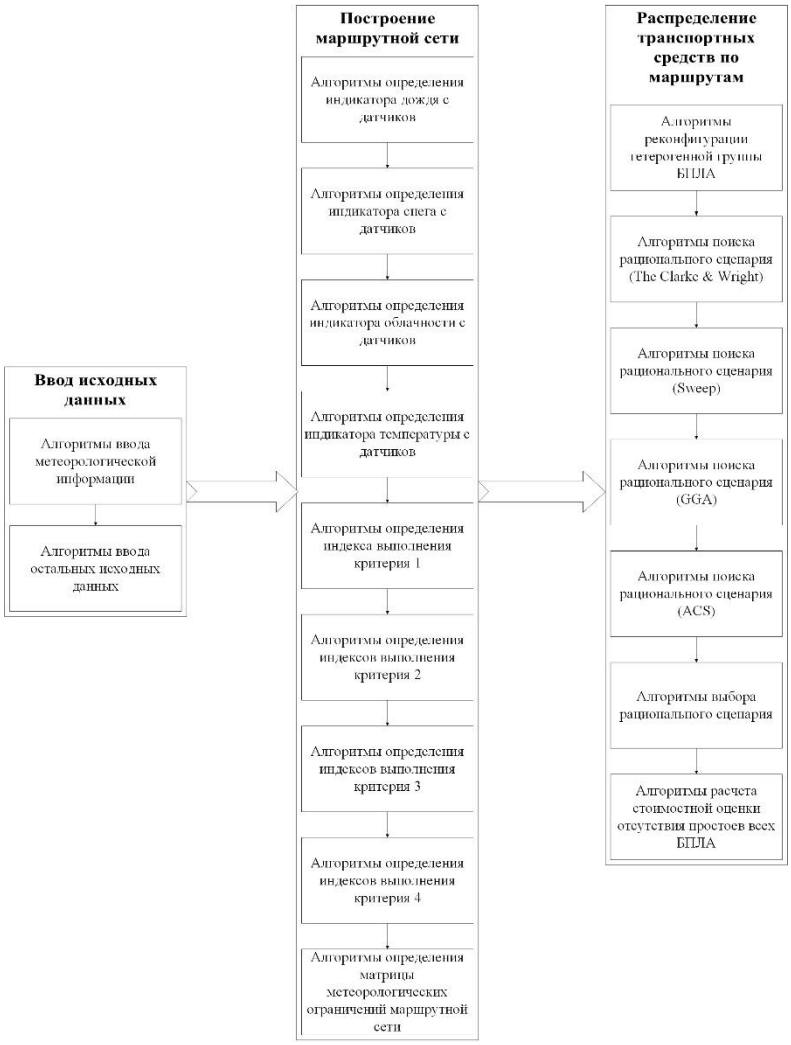


Рисунок Б.14. Детальная логическая схема работы разработанного алгоритмического обеспечения в благоприятных условиях

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Данные проводимых экспериментов для разработанного метода

Метеостатистика

i	ei	ci	Ti	Дата	Щелкните для добавления
1		[Sc Ac trans Ci f	-0.2	01.янв	
2		[Sc Ac trans Ci f	-0.3	01.янв	
3	позёмок {мете	[Sc Ac trans Ci f	-0.9	01.янв	
4	{метель}	[Ac trans Ci fib]	-2.3	01.янв	
5	{метель}	[Ci fib]	-3.3	01.янв	
6		ясно	-3.4	01.янв	
7		ясно	-3.7	01.янв	
8		ясно	-3.9	01.янв	
9		ясно	-3.1	02.янв	
10		ясно	-1.3	02.янв	
11		[Ac trans Ci fib]	-2.0	02.янв	
12		[Ci fib]	-2.4	02.янв	
13		[Sc Ci fib]	-4.4	02.янв	
14		[Sc Ac trans Ci f	-3.9	02.янв	
15		[Sc Ac trans]	-4.0	02.янв	
16		[Sc Ac trans Ci f	-4.0	03.янв	
17		[Sc Ac trans Ci f	-3.4	03.янв	
18	осадки на расс	[Cb cap Ac tran	-3.6	03.янв	
19		[Sc Ac trans]	-4.4	03.янв	
20		[Sc Ac trans]	-4.8	03.янв	
21	слаб. ливнево	[Cb cap Ac tran	-4.5	03.янв	
22	{ливн. снег}	[Sc Ci fib]	-3.4	03.янв	
23		[Sc]	-5.0	03.янв	
24		[Sc]	-3.4	04.янв	
25	осадки на расс	[Cb cap]	-3.1	04.янв	
26	осадки на расс	[Cb cap]	-3.6	04.янв	
27		[Sc]	-3.8	04.янв	
28		[Sc]	-4.6	04.янв	
29	слаб. ливнево	[Cb cap]	-4.4	04.янв	
30	в посл. час лив	[Sc]	-4.8	04.янв	

Рисунок В.1. Табличная запись начальной части исходных данных эксперимента

Метеостатистика

i	ei	ci	Ti	Дата	Щелкните для добавления
4911	{ливн. снег}	[Sc]	-6.8	28.дек	
4912	{ливн. снег}	[Sc]	-5.9	28.дек	
4913	слаб. ливнево	[Cb cap]	-6.4	28.дек	
4914	{ливн. снег}	[Sc Ac trans]	-6.0	29.дек	
4915		[Sc Ac trans Ci f	-5.6	29.дек	
4916		[Sc Ac trans Ci f	-6.3	29.дек	
4917		[Sc]	-8.4	29.дек	
4918		[Sc]	-9.1	29.дек	
4919		[Sc Ac trans Ci f	-9.6	29.дек	
4920		[Sc Ac trans]	-9.9	29.дек	
4921		[Sc Ac trans]	-10.1	29.дек	
4922		[Sc]	-9.5	30.дек	
4923		[Sc Ac trans Ci f	-8.7	30.дек	
4924		[Ac trans Ci fib]	-9.3	30.дек	
4925		[Ac trans Ci fib]	-10.0	30.дек	
4926		[Sc Ac trans Ci f	-10.0	30.дек	
4927	слаб. ливнево	[Cb cap]	-11.0	30.дек	
4928	слаб. ливнево	[Cb cap]	-10.2	30.дек	
4929	{ливн. снег}	[Sc]	-9.7	30.дек	
4930	{ливн. снег}	[Sc Ac trans]	-9.2	31.дек	
4931		[Sc Ac trans]	-7.5	31.дек	
4932		[Sc Ac trans]	-8.0	31.дек	
4933		[Ac trans]	-9.9	31.дек	
4934		[Sc]	-10.6	31.дек	
4935		[Sc]	-11.2	31.дек	
4936		[Sc]	-11.5	31.дек	
4937		[Sc]	-10.6	31.дек	
(№)					

Рисунок В.2. Табличная запись конечной части исходных данных эксперимента.

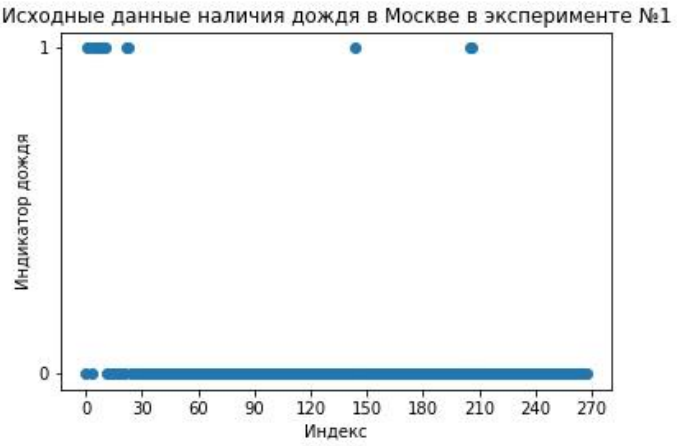


Рисунок В.3. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Москве в эксперименте №1

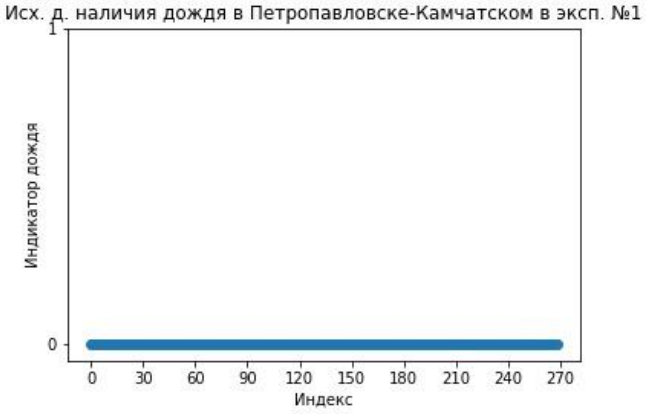


Рисунок В.4. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

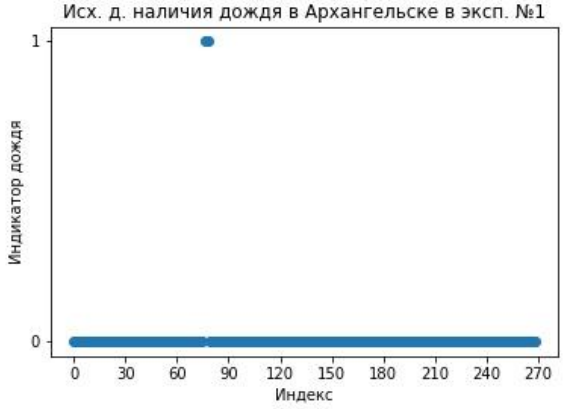


Рисунок В.5. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Архангельске в эксперименте №1

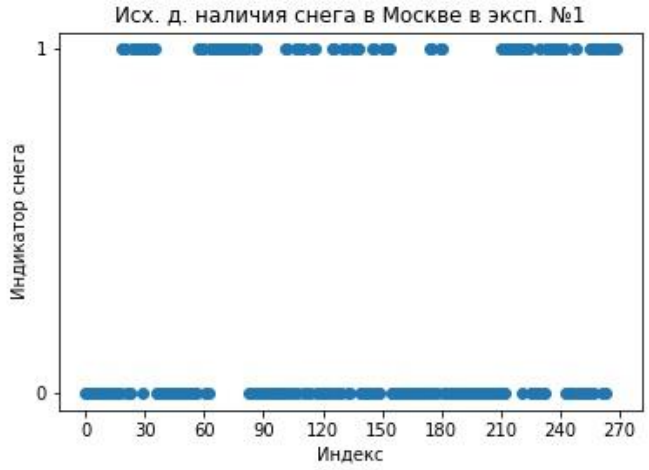


Рисунок В.6. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Москве в эксперименте №1

Рисунок В.7. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

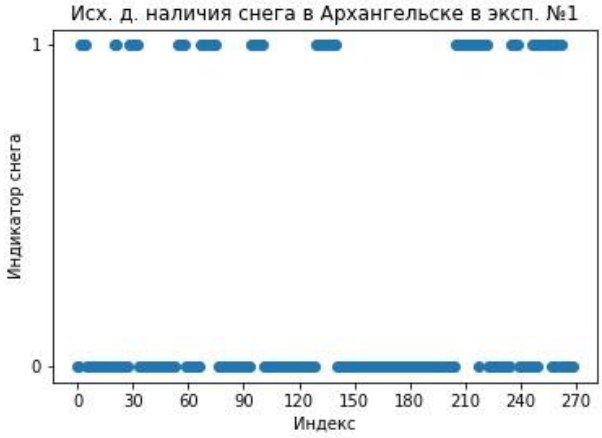


Рисунок В.8. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Архангельске в эксперименте №1

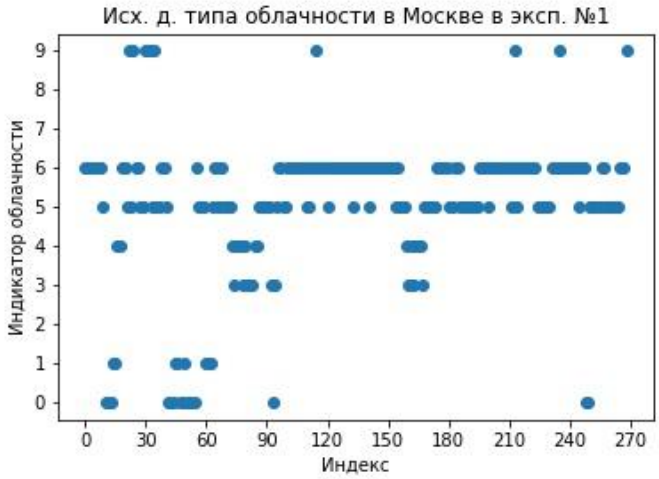


Рисунок В.9. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Москве в эксперименте №1

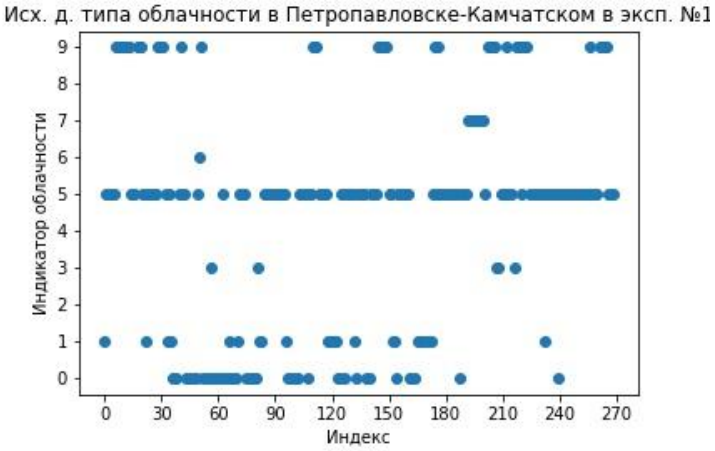


Рисунок В.10. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

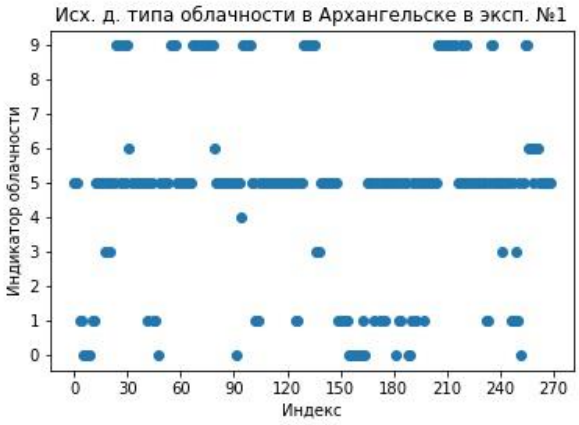


Рисунок В.11. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Архангельске в эксперименте №1

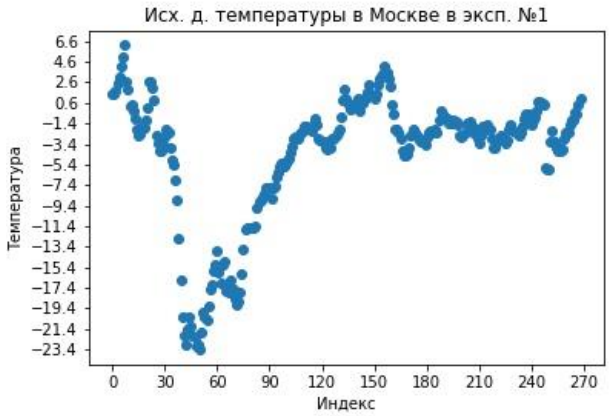


Рисунок В.12. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Москве в эксперименте №1

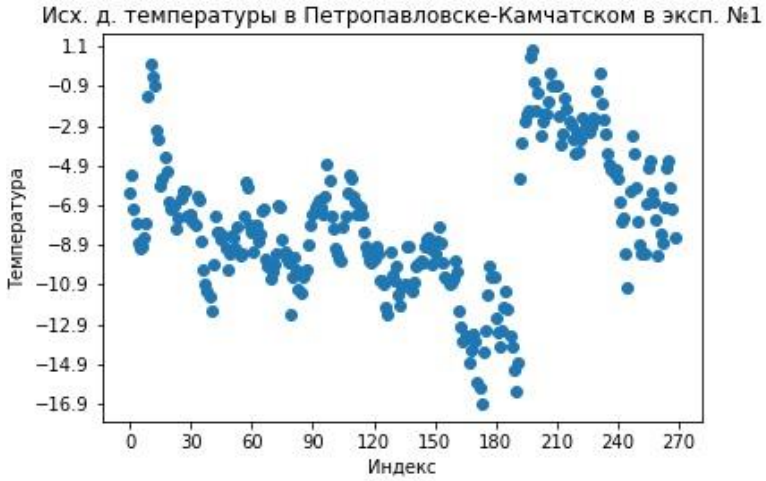


Рисунок В.13. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

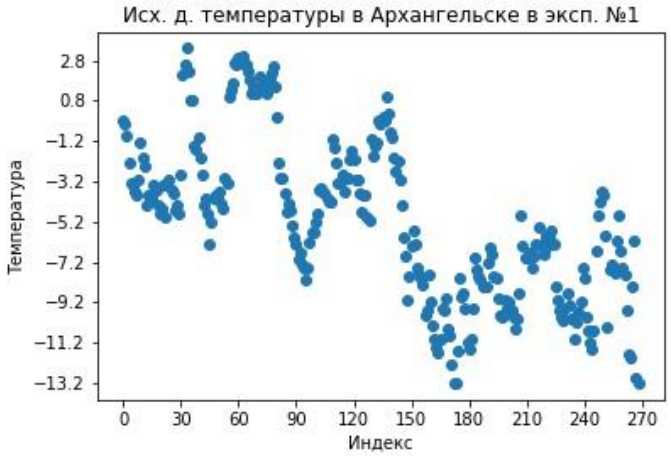


Рисунок В.14. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Архангельске в эксперименте №1

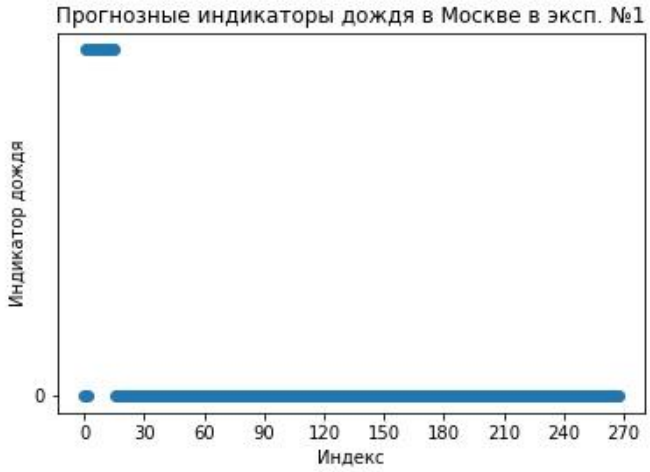


Рисунок В.15. Прогнозные индикаторы дождя в Москве в эксперименте №1

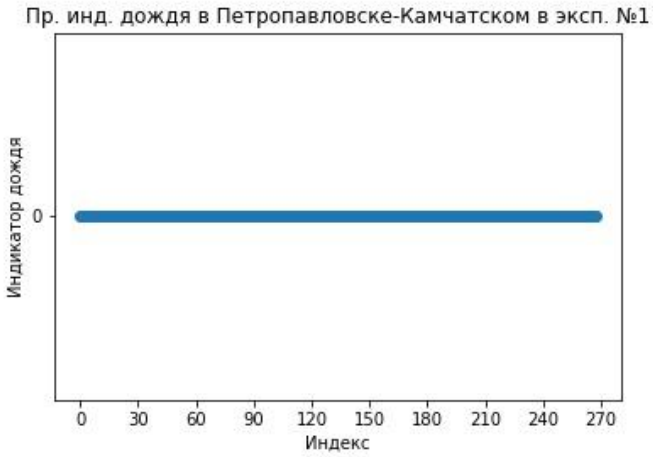


Рисунок В.16. Прогнозные индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

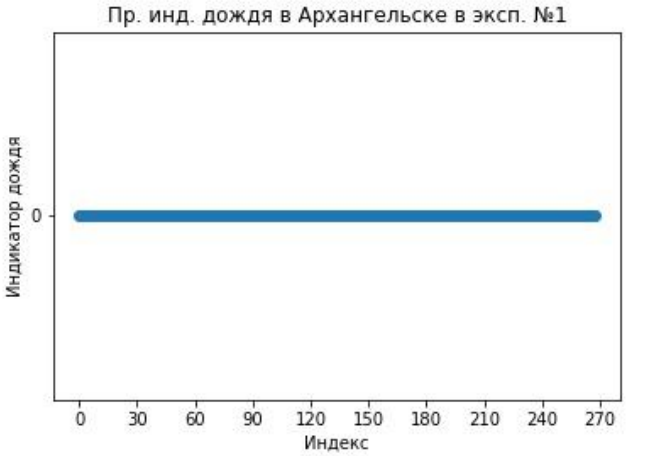


Рисунок В.17. Прогнозные индикаторы дождя в Архангельске в эксперименте №1

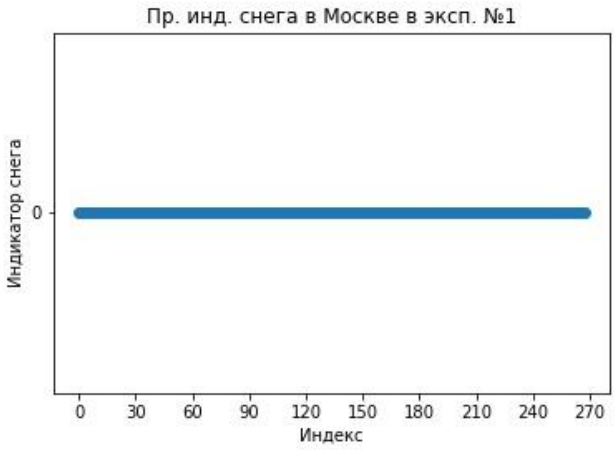


Рисунок В.18. Прогнозные индикаторы снега в Москве в эксперименте №1

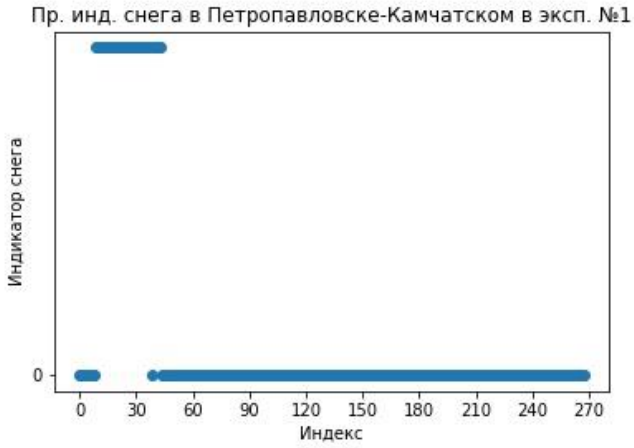


Рисунок В.19. Прогнозные индикаторы снега в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

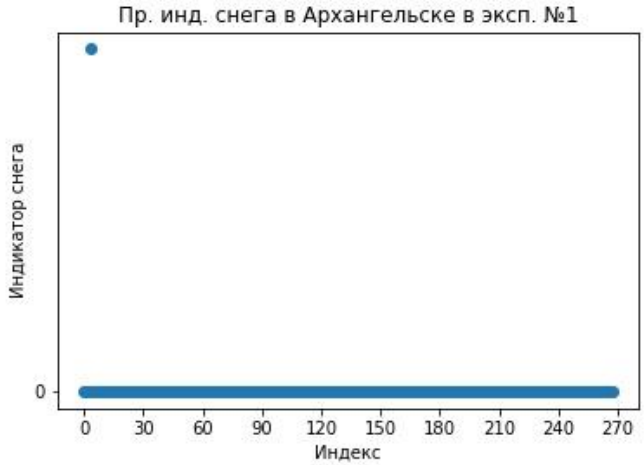


Рисунок В.20. Прогнозные индикаторы дождя в Архангельске в эксперименте №1

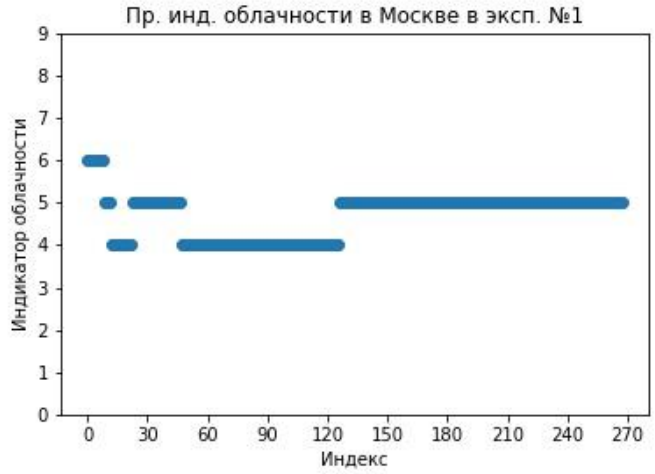


Рисунок В.21. Прогнозные индикаторы облачности в Москве в эксперименте №1

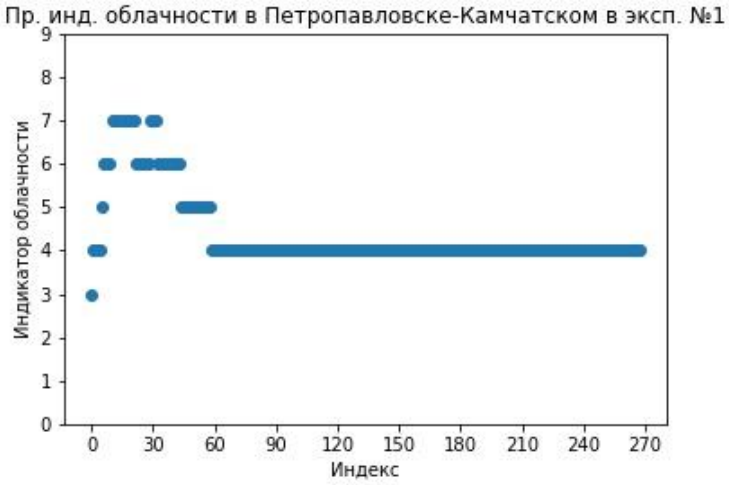


Рисунок В.22. Прогнозные индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

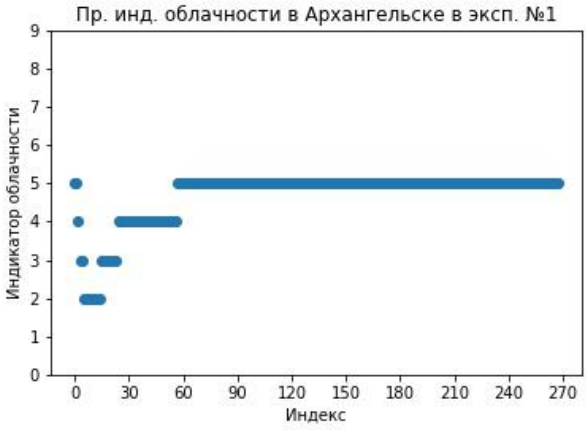


Рисунок В.23. Прогнозные индикаторы облачности в Архангельске в эксперименте №1

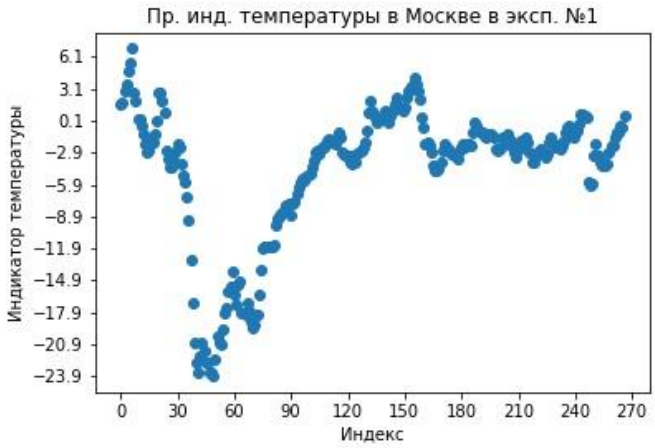


Рисунок В.24. Прогнозные индикаторы температуры в Москве в эксперименте №1

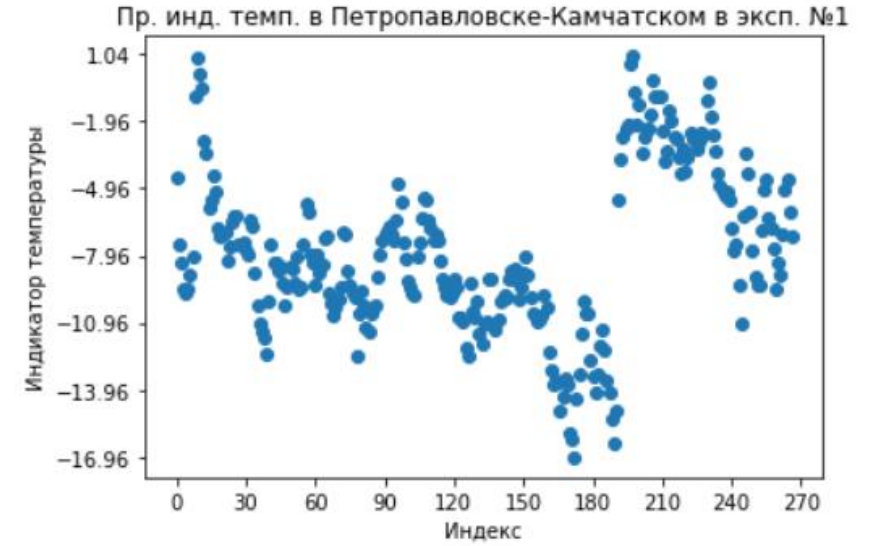


Рисунок В.25. Прогнозные индикаторы температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №1

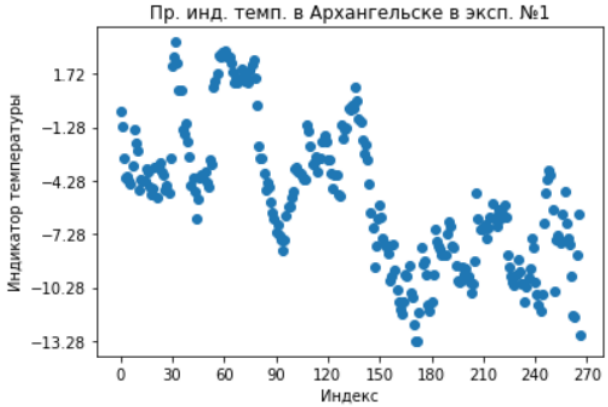


Рисунок В.26. Прогнозные индикаторы температуры в Архангельске в эксперименте №1

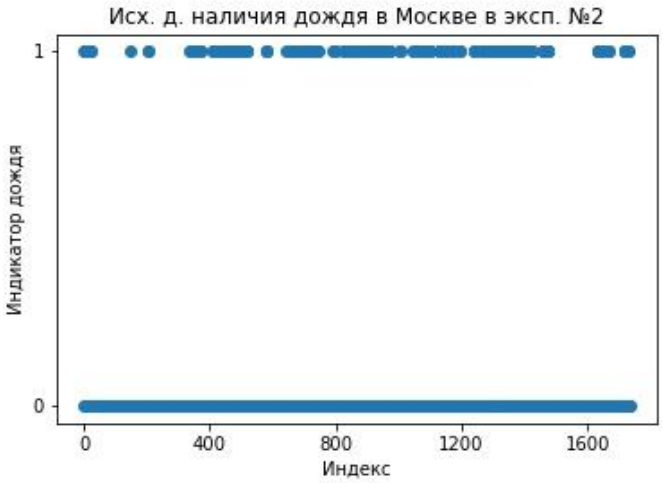


Рисунок В.27. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Москве в эксперименте №2

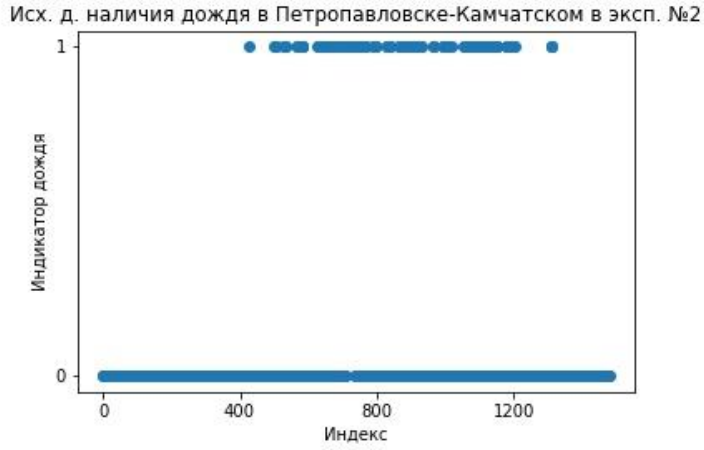


Рисунок В.28. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

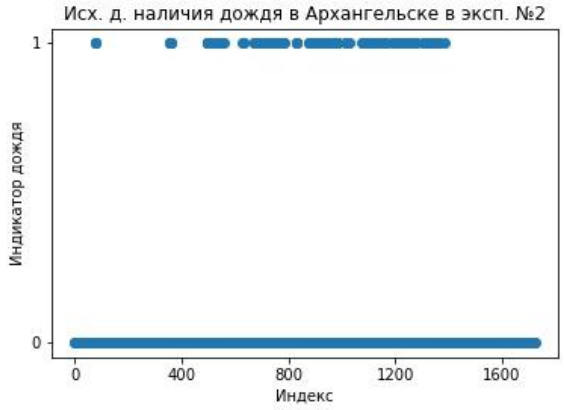


Рисунок В.29. Исходные статистические данные показателя «Индикатор дождя» в Архангельске в эксперименте №2

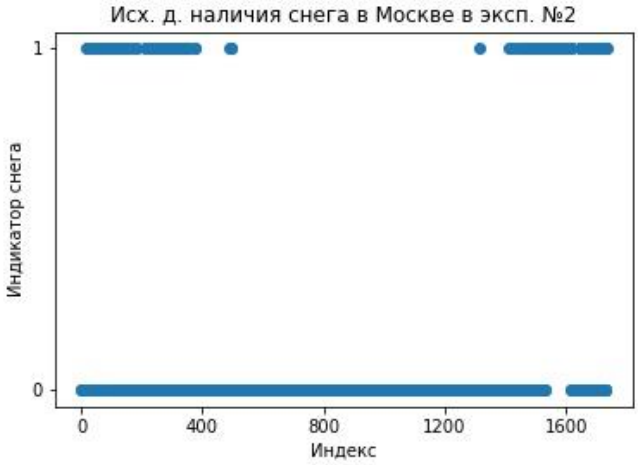


Рисунок В.30. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Москве в эксперименте №2

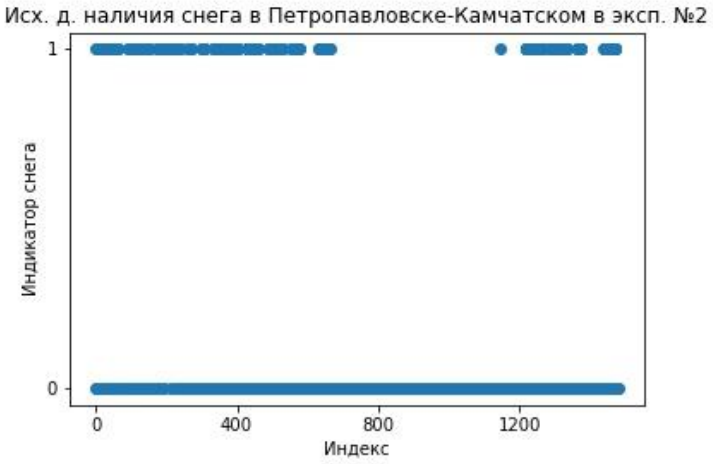


Рисунок В.31. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

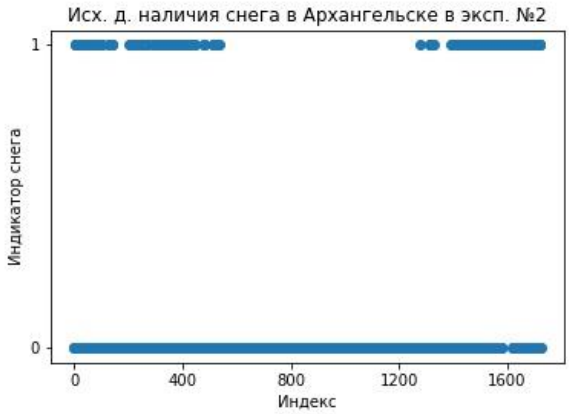


Рисунок В.32. Исходные статистические данные показателя «Индикатор снега» в Архангельске в эксперименте №2

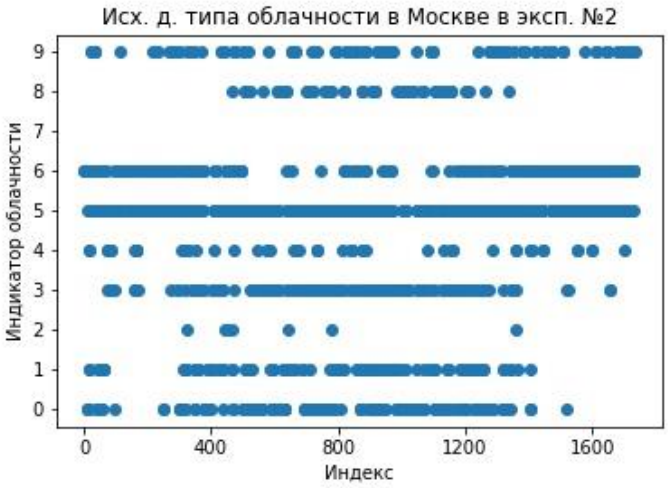


Рисунок В.33. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Москве в эксперименте №2

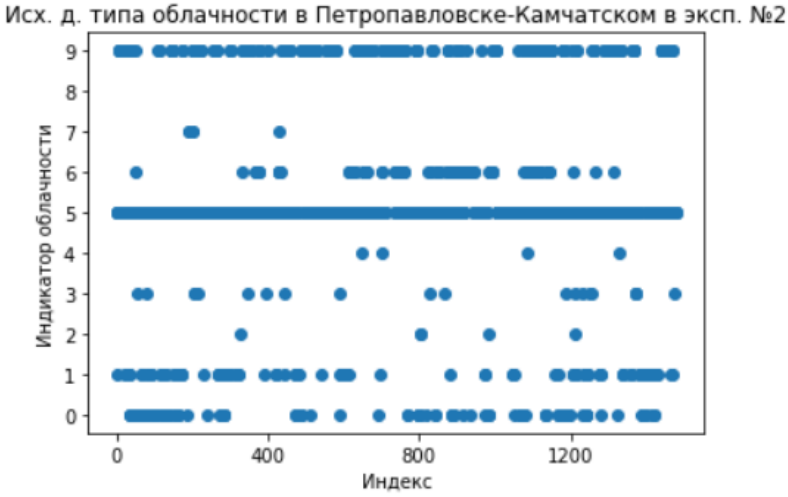


Рисунок В.34. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

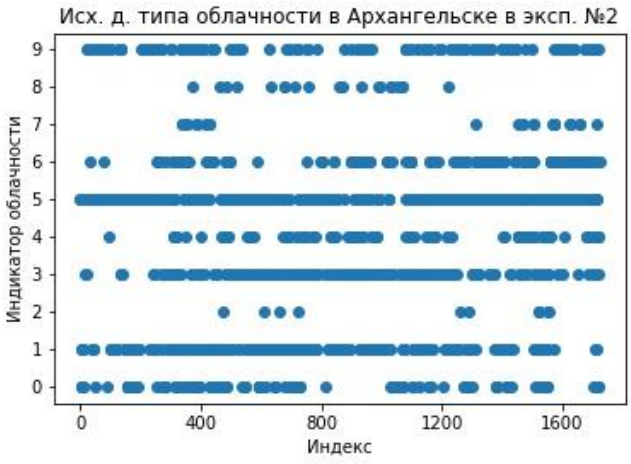


Рисунок В.35. Исходные статистические данные показателя «Индикатор облачности» в Архангельске в эксперименте №2

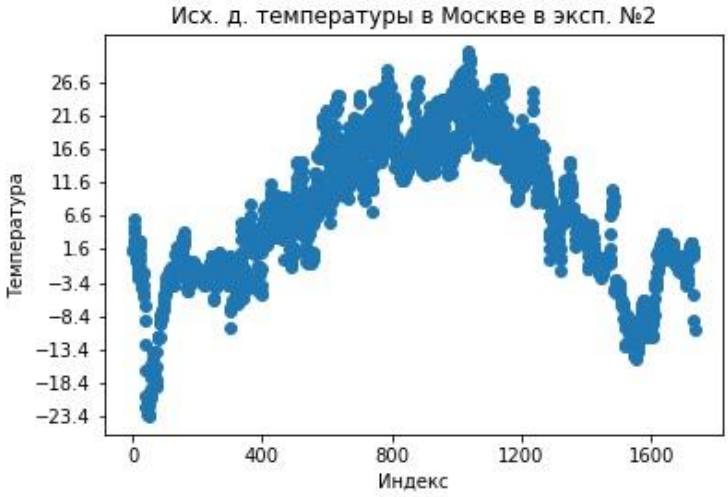


Рисунок В.36. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Москве в эксперименте №2

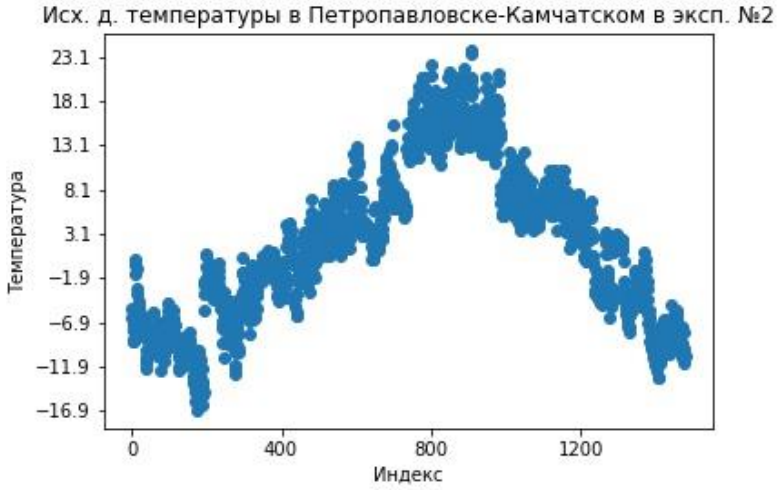


Рисунок В.37. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

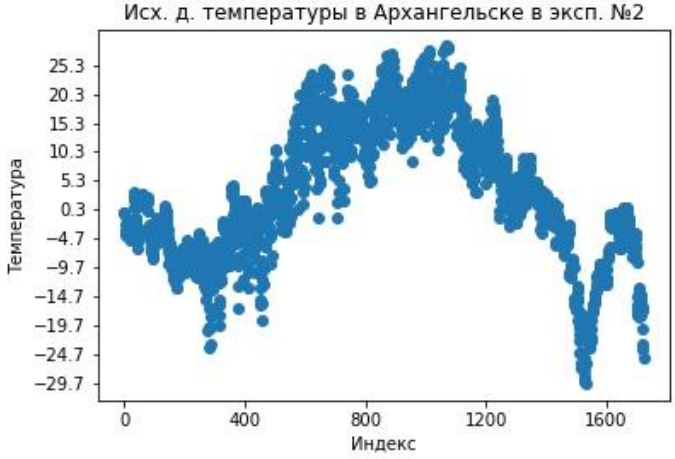


Рисунок В.38. Исходные статистические данные показателя «Температура» в Архангельске в эксперименте №2

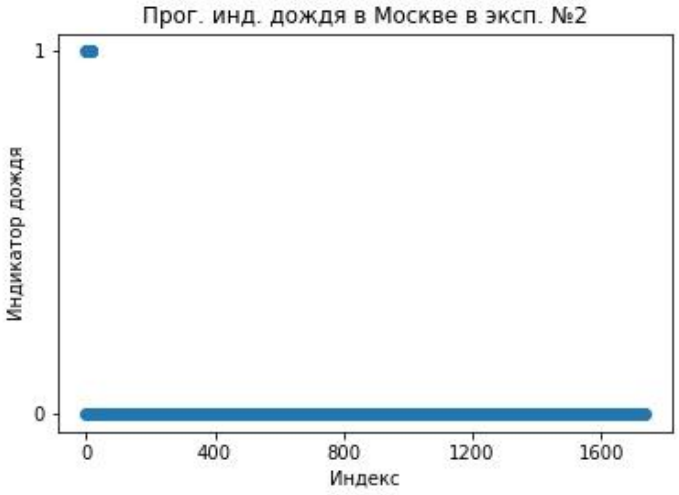


Рисунок В.39. Прогнозные индикаторы дождя в Москве в эксперименте №2

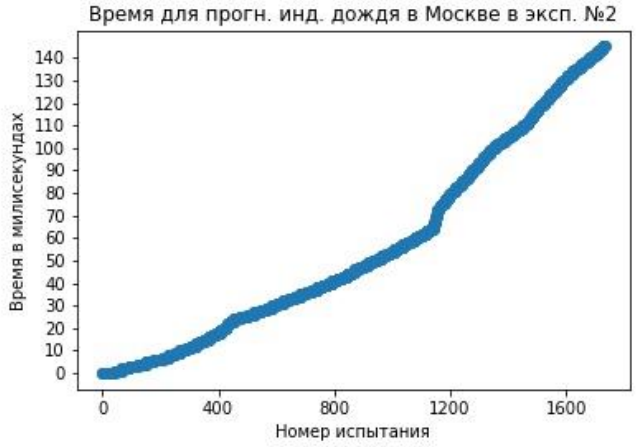


Рисунок В.40. Время получения прогнозных индикаторов дождя в Москве в эксперименте №2

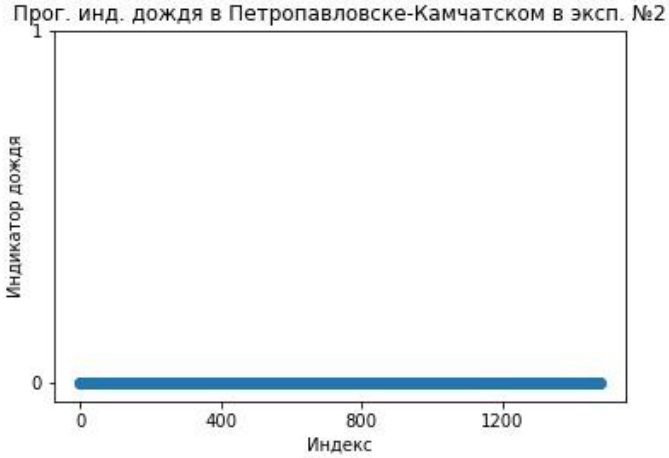


Рисунок В.41. Прогнозные индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

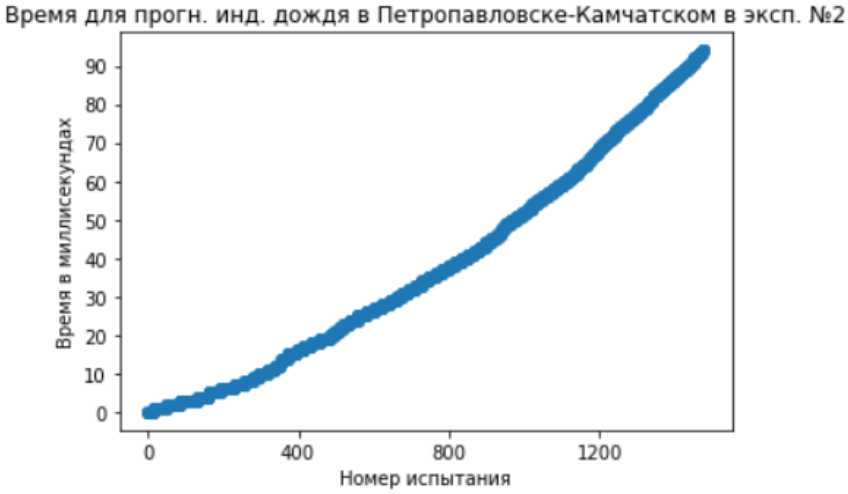


Рисунок В.42. Время получения прогнозных индикаторов дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

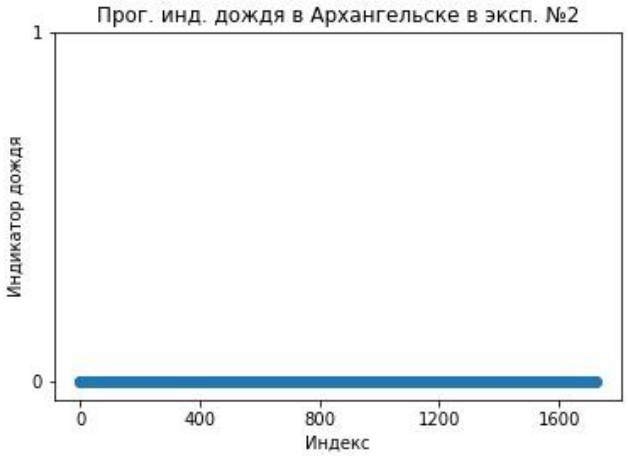


Рисунок В.43. Прогнозные индикаторы дождя в Архангельске в эксперименте №2

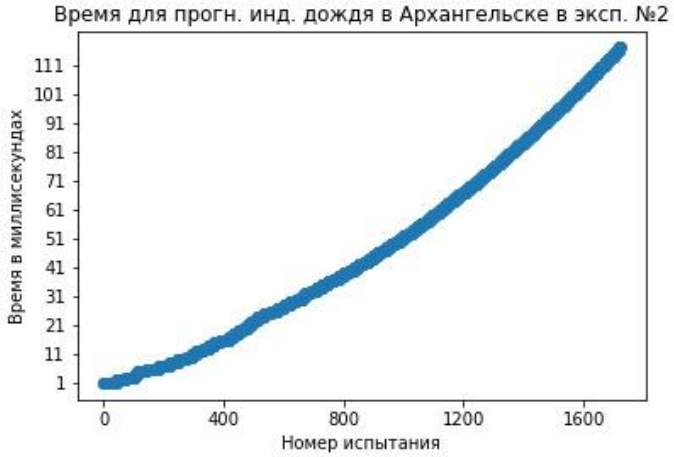


Рисунок В.44. Время получения прогнозных индикаторов дождя в Архангельске в эксперименте №2

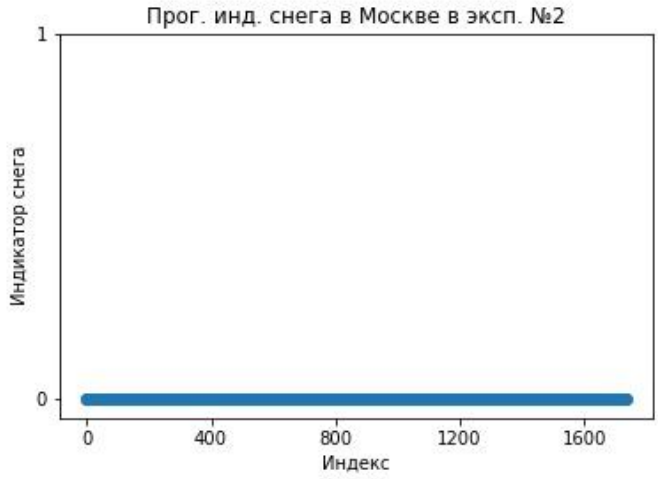


Рисунок В.45. Прогнозные индикаторы снега в Москве в эксперименте №2

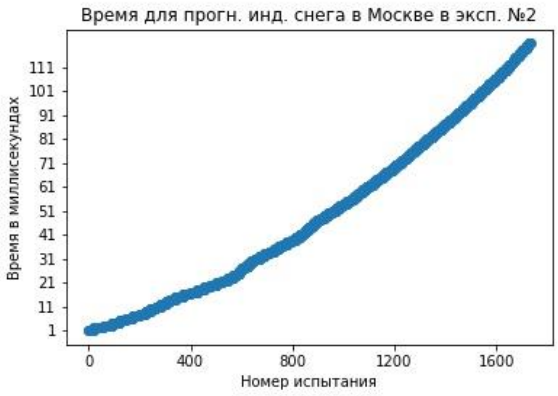


Рисунок В.46. Время получения прогнозных индикаторов снега в Москве в эксперименте №2

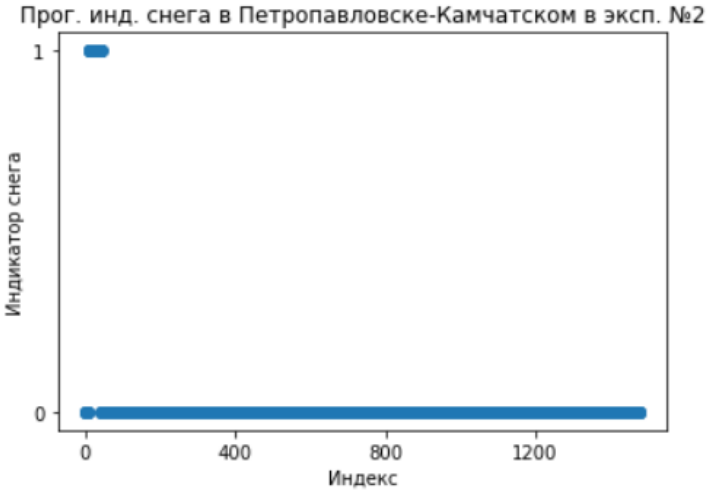


Рисунок В.47. Прогнозные индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

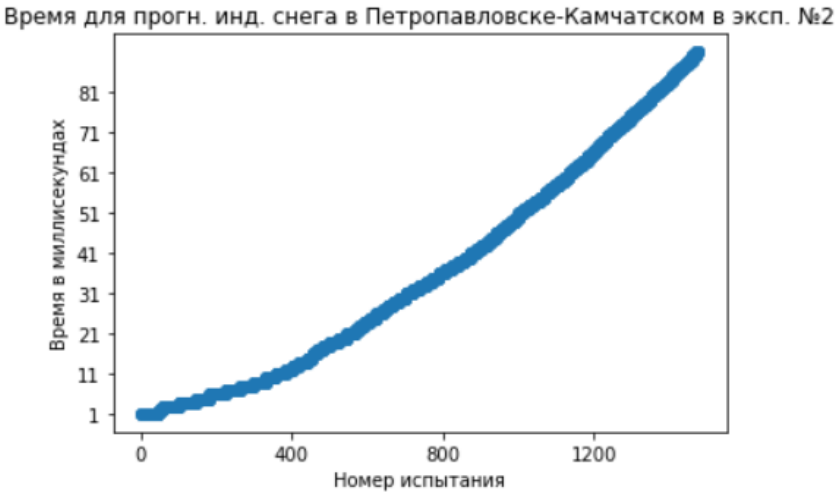


Рисунок В.48. Время получения прогнозных индикаторов снега в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

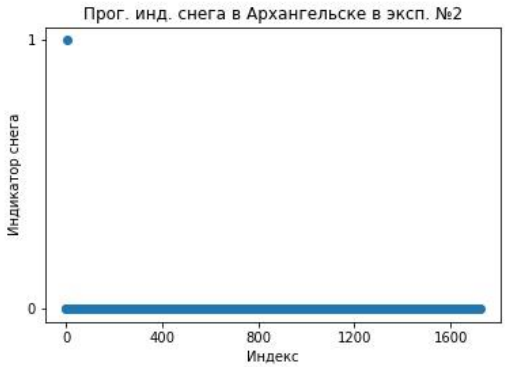


Рисунок В.49. Прогнозные индикаторы снега в Архангельске в эксперименте №2

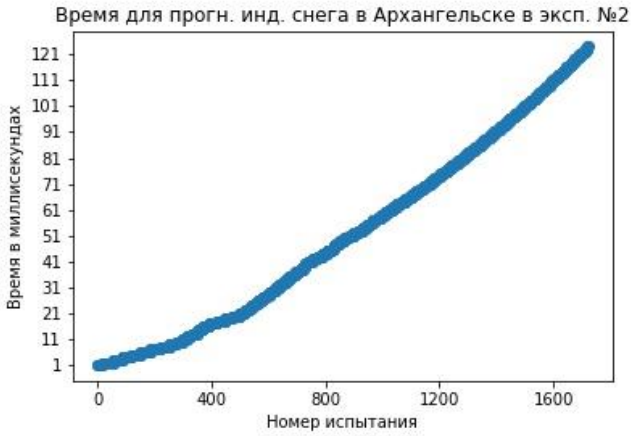


Рисунок В.50. Время получения прогнозных индикаторов снега в Архангельске в эксперименте №2

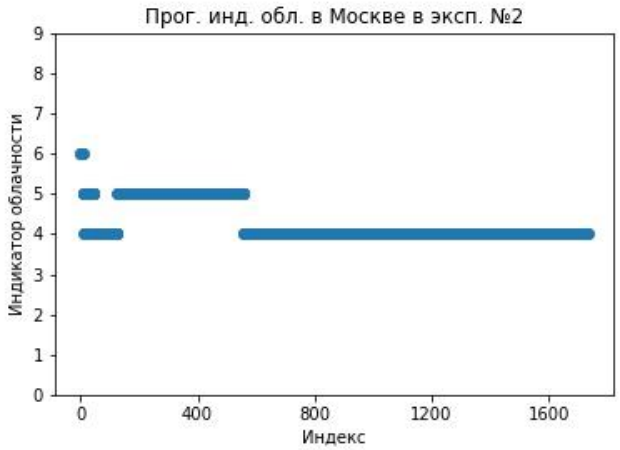


Рисунок В.51. Прогнозные индикаторы облачности в Москве в эксперименте №2

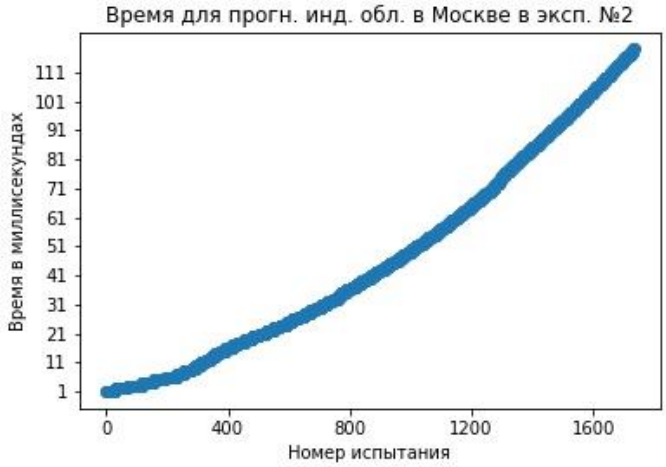


Рисунок В.52. Время получения прогнозных индикаторов облачности в Москве в эксперименте №2

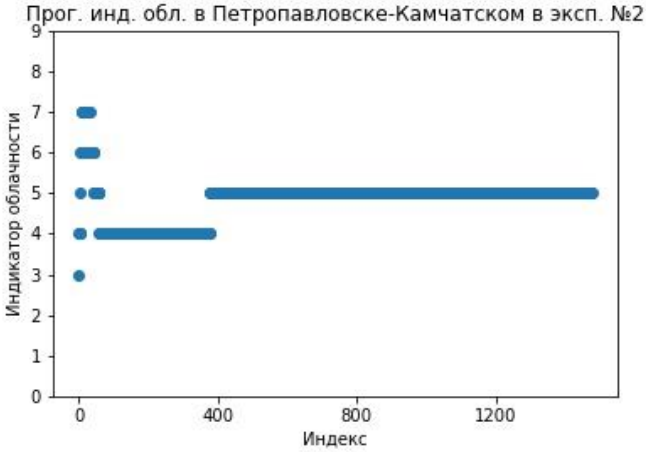


Рисунок В.53. Прогнозные индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

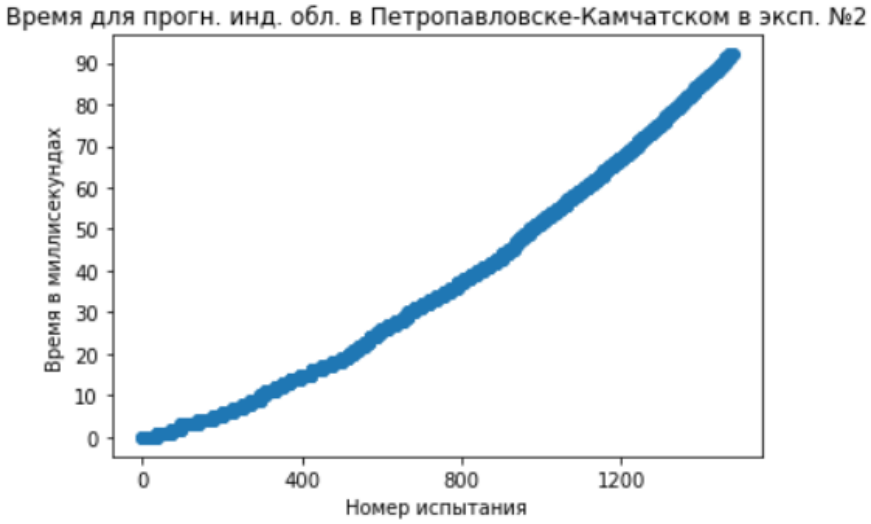


Рисунок В.54. Время получения прогнозных индикаторов облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

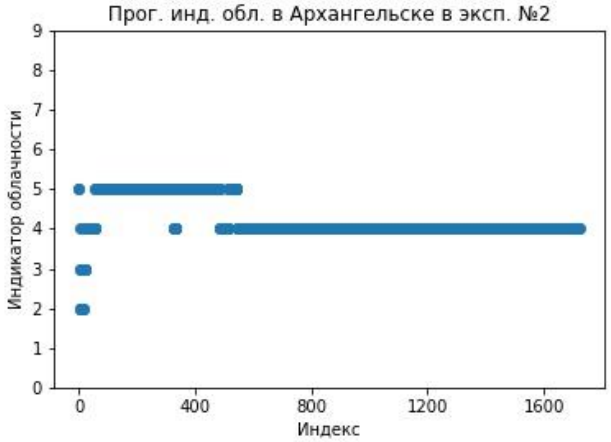


Рисунок В.55. Прогнозные индикаторы облачности в Архангельске в эксперименте №2

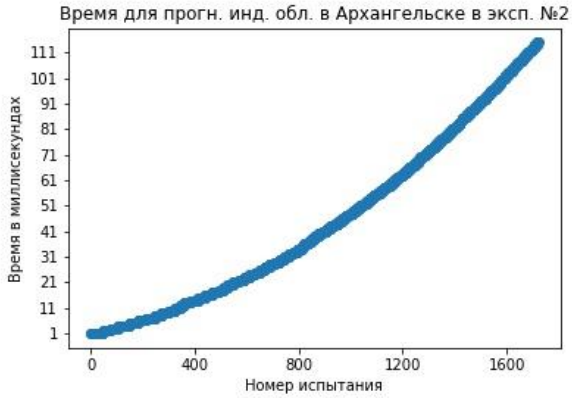


Рисунок В.56. Время получения прогнозных индикаторов облачности в Архангельске в эксперименте №2

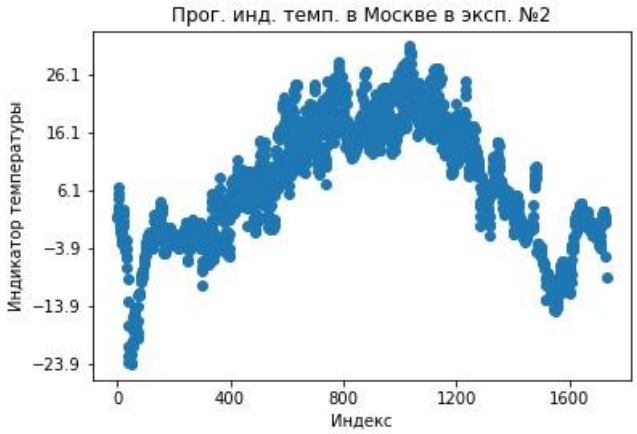


Рисунок В.57. Прогнозные индикаторы температуры в Москве в эксперименте №2

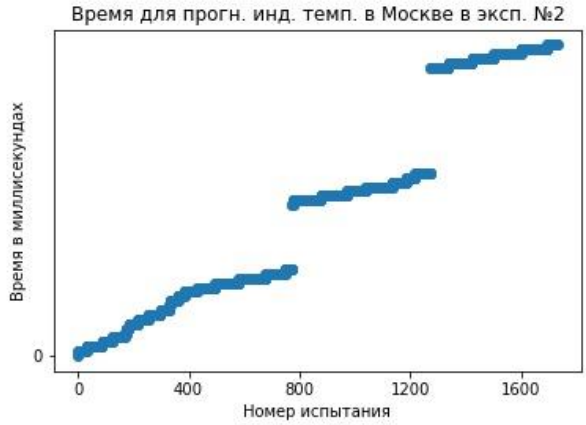


Рисунок В.58. Время получения прогнозных индикаторов температуры в Москве в эксперименте №2

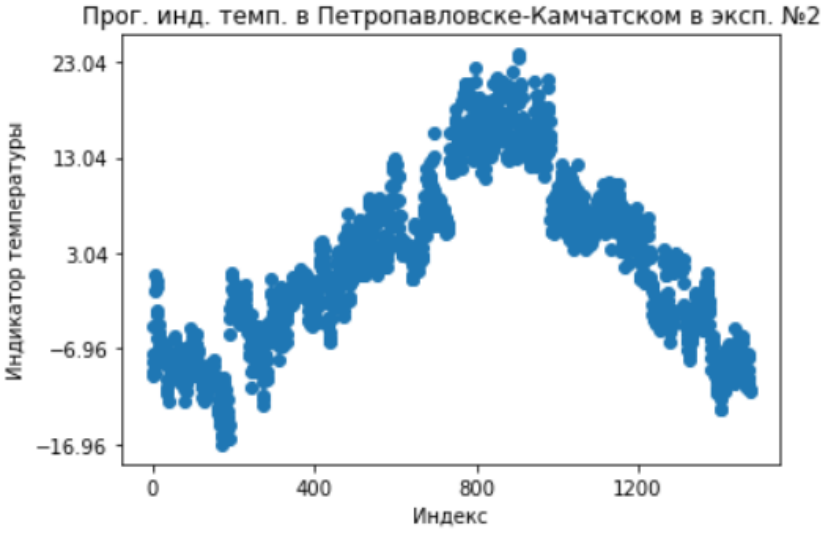


Рисунок В.59. Прогнозные индикаторы температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

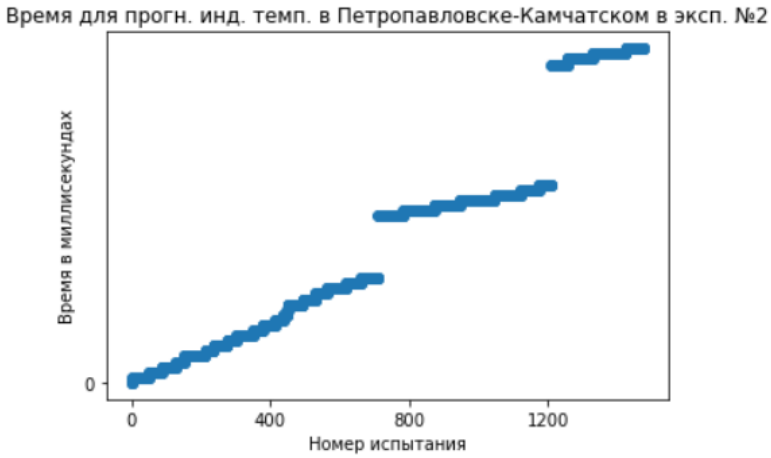


Рисунок В.60. Время получения прогнозных индикаторов температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

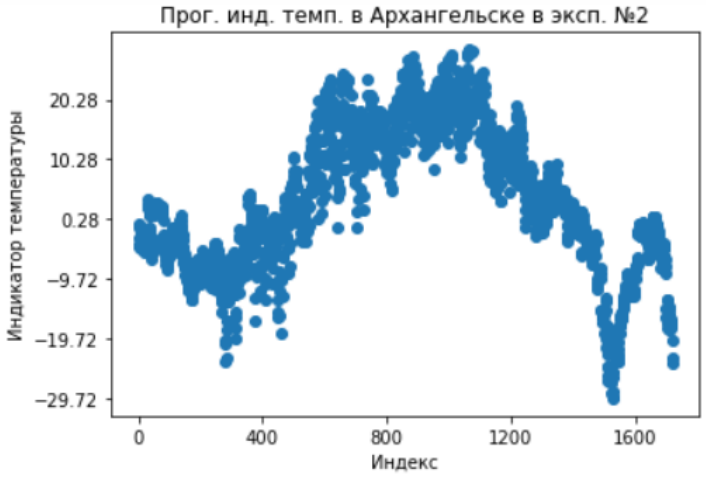


Рисунок В.61. Прогнозные индикаторы температуры в Архангельске в эксперименте №2

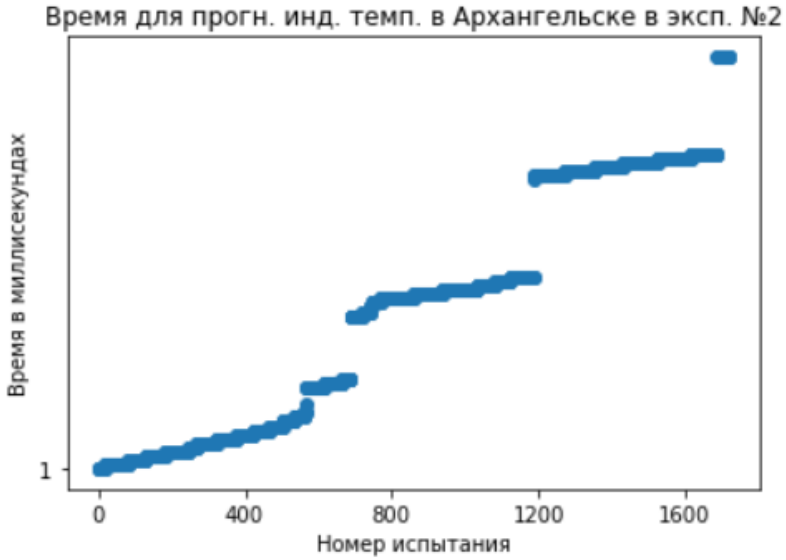


Рисунок В.62. Время получения прогнозных индикаторов температуры в Архангельске в эксперименте №2

Таблица В.1 - Статистические характеристики для прогнозных и существующих индикаторов в эксперименте №2

Индикаторы	**Ср. прогнозных инд.**	**Ср. сущ. индикаторов**	**Дисп. прогнозных инд.**	**Дисп. сущ. инд.**
Индикаторы дождя в Москве	0.044	0.140	0.002 (0.0018)	0.002(0.0015)
Индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском	0.000	0.081	0.000	0.004
Индикаторы дождя в Архангельске	0.000	0.078	0.000	0.002
Индикаторы снега в Москве	0.000	0.229	0.000	0.003
Индикаторы снега в Петропавловске-Камчатском	0.009	0.282	0.003	0.001
Индикаторы снега в Архангельске	0.004	0.216	0.000(0.0001)	0.001(0.0013)
Индикаторы облачности в Москве	4.551	4.391	0.007	1.307
Индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском	4.689	4.824	0.093	1.785
Индикаторы облачности в Архангельске	4.423	4.208	0.035	0.328
Индикаторы температуры в Москве	3.200	3.241	1083.1488	1101.4125
Индикаторы температуры в Петропавловске-Камчатском	-1.823	-1.825	921.559	928.931
Индикаторы температуры в Архангельске	0.995	1.036	2562.555	2544.302

Таблица В.2 - Характеристики проверок гипотез для прогнозных и существующих индикаторов дождя в эксперименте №2

Индикаторы	**Ср. прогн. инд.**	**Ср. сущ. инд.**	**Статистика**	**Интервал допуст. значений для уровня значимости 0.05**	**Результат проверки**
Индикаторы дождя в Москве	0.044	0.140	-9.833	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться
Индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском	0.000	0.081	-11.223	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться
Индикаторы дождя в Архангельске	0.000	0.078	-11.864	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться

Таблица В.3 – Характеристики проверок гипотез для прогнозных и существующих индикаторов снега в эксперименте №2

Индикаторы	**Ср. прогнозных инд.**	**Ср. сущ. инд.**	**Статистика**	**Интервал допуст. значений для уровня значимости 0.05**	**Результат проверки**
Индикаторы снега в Москве	0.000	0.229	-21.109	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться
Индикаторы снега в Петропавловске-Камчатском	0.009	0.282	-13.032	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться
Индикаторы снега в Архангельске	0.004	0.216	-18.707	(-1.65;1.65)	Гипотеза может отклоняться

Таблица В.4 - Проверки для прогнозных и существующих индикаторов облачности в эксперименте №2

Индикаторы	**Ср. прогнозных инд.**	**Ср. сущ. индикаторов**	**Разница средних в %**	**Проверка успешна**
Индикаторы облачности в Москве	4.551	4.391	3.516	Да

Индикаторы	Ср. прогнозных инд.	Ср. сущ. индикаторов	Разница средних в %	Проверка успешна
Индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском	4.689	4.824	2.799	Да
Индикаторы облачности в Архангельске	4.423	4.208	4.861	Да

Таблица В.5 - Характеристики проверок гипотез для прогнозных и существующих индикаторов температуры на основе критерия Стьюдента в эксперименте №2

Индикаторы	Статистика	Степени свободы	Уровень значимости	Сравнение с квантилем для 1000 значений	Результат проверки
Индикаторы температуры в Москве	0.036	3464	0.01	0.036<2.58	Да
Индикаторы температуры в Петропавловске-Камчатском	0.002	2954	0.01	0.002<2.58	Да
Индикаторы температуры в Архангельске	0.024	3442	0.01	0.024<2.58	Да

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельства о государственной регистрации ЭВМ

3462

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024617755

«Программа для визуализации транспортировки грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов с учетом метеорологических характеристик»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (RU)***

Автор(ы): ***Саломатин Александр Александрович (RU)***

Заявка № **2024616683**
Дата поступления **29 марта 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***04 апреля 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

3463

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024617778

«Программа для поиска эффективного распределения транспортных средств по маршрутам с учетом метеорологических характеристик»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (RU)***

Автор(ы): ***Саломатин Александр Александрович (RU)***

Заявка № **2024616690**
Дата поступления **29 марта 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***04 апреля 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Данные проводимых экспериментов для разработанного алгоритмического обеспечения

Таблица Д.1 - Характеристики БПЛА в эксперименте №1

Характеристика	**БПЛА №1 (самодельный)**	**DJI Mavic Air 2**	**DJI Agras MG-1**
Тип	1	2	3
v_{i1}, м/с	15	19	17
v_{i2}, м/с	6	5	5
v_{i3}, м/с	6	4	3
v_{i4}, кг	0.6	0.3	3
v_{i5}, руб	150	150	150
v_{i5}, м	150	150	150
r_{i1}	4	4	5
r_{i2}	3	3	2
T_{i1}, °C	-20	-40	-20
T_{i2}, °C	50	20	50

Таблица Д.2 - Характеристики грузов в эксперименте №1

Характеристика	**Обувь**	**Еда**	**Медикаменты**
g_{k1}	2	3	4
g_{k2}, кг	1.0	0.8	1.2
g_{k3}, руб	2000	500	500

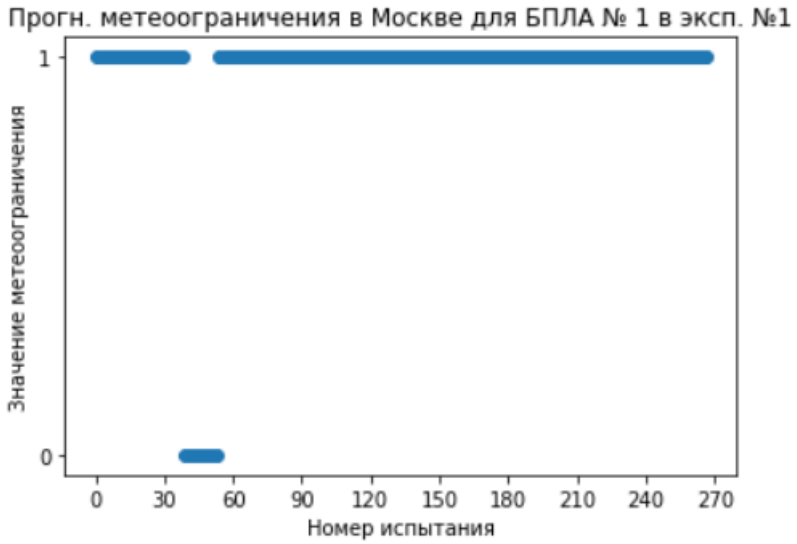


Рисунок Д.1. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №1 в эксперименте №1

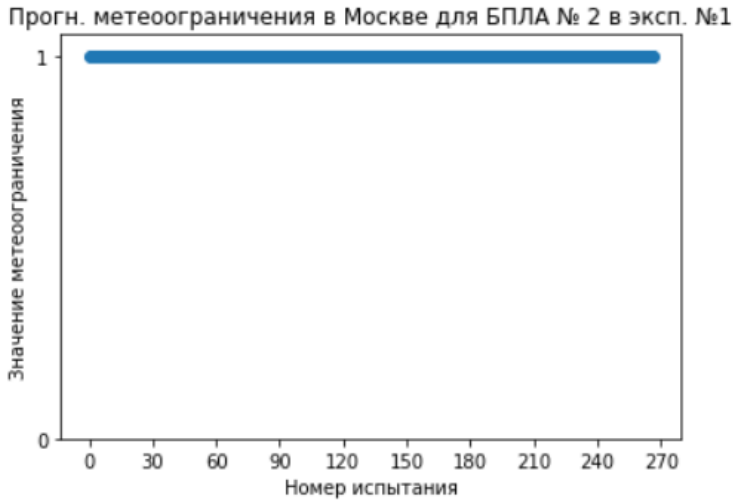


Рисунок Д.2. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №2 в эксперименте №1

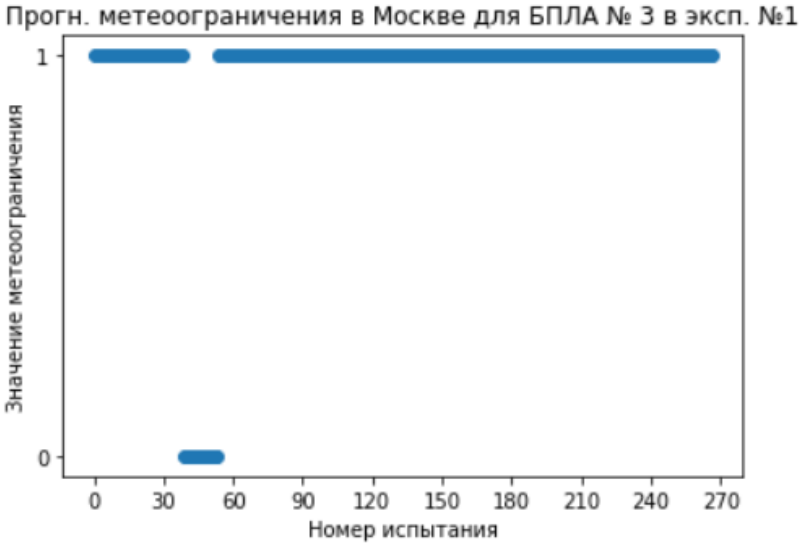


Рисунок Д.3. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №3 в эксперименте №1

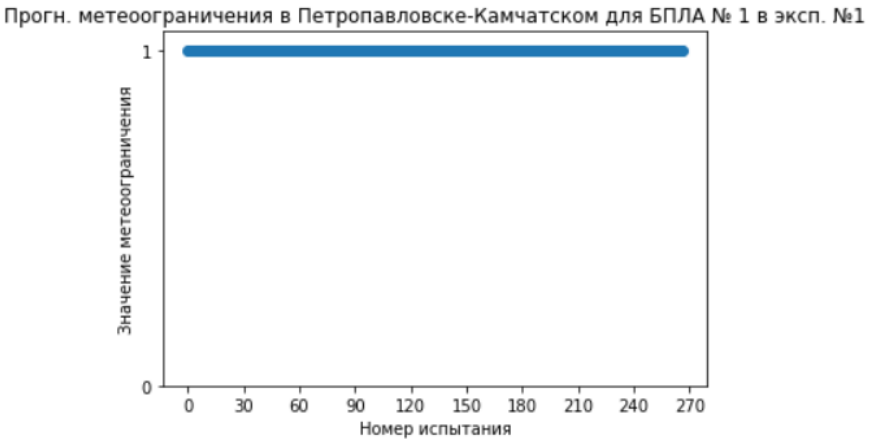


Рисунок Д.4. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №1 в эксперименте №1

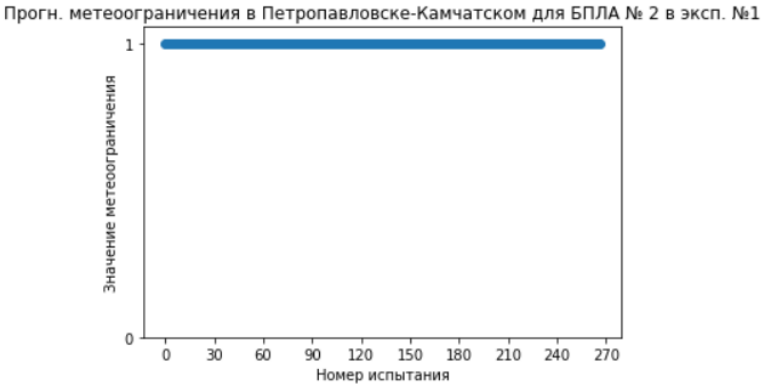


Рисунок Д.5. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №2 в эксперименте №1

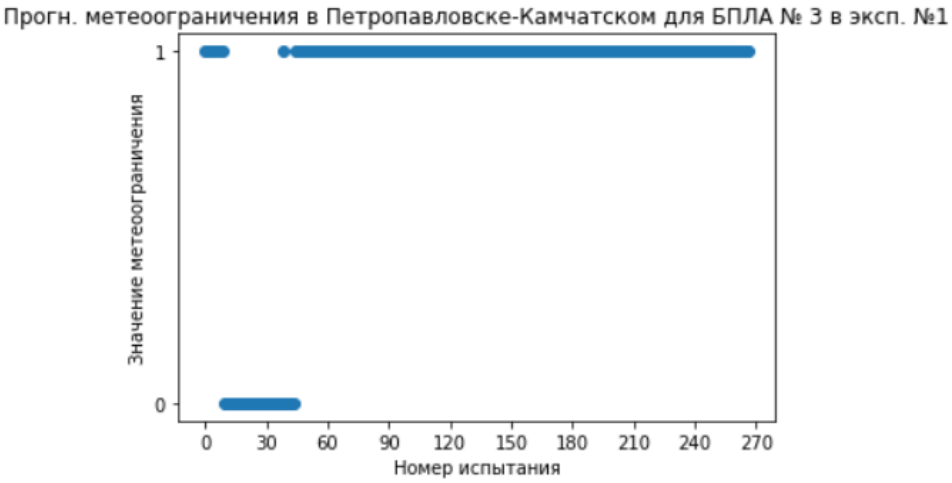


Рисунок Д.6. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №3 в эксперименте №1

Рисунок Д.7. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №1 в эксперименте №1

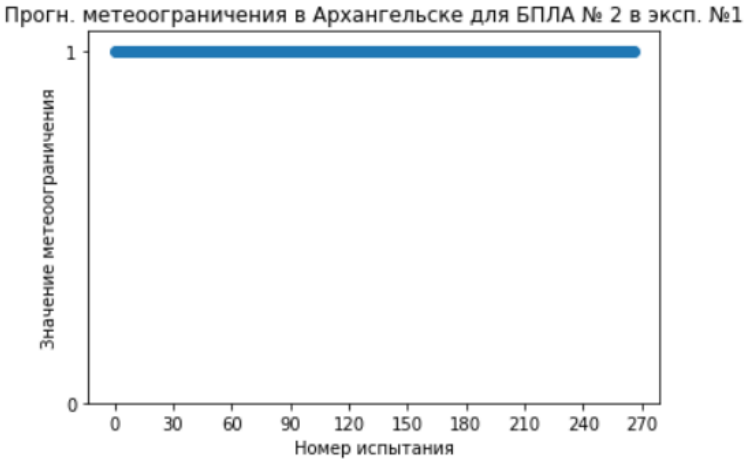


Рисунок Д.8. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №2 в эксперименте №1

Рисунок Д.9. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №3 в эксперименте №1

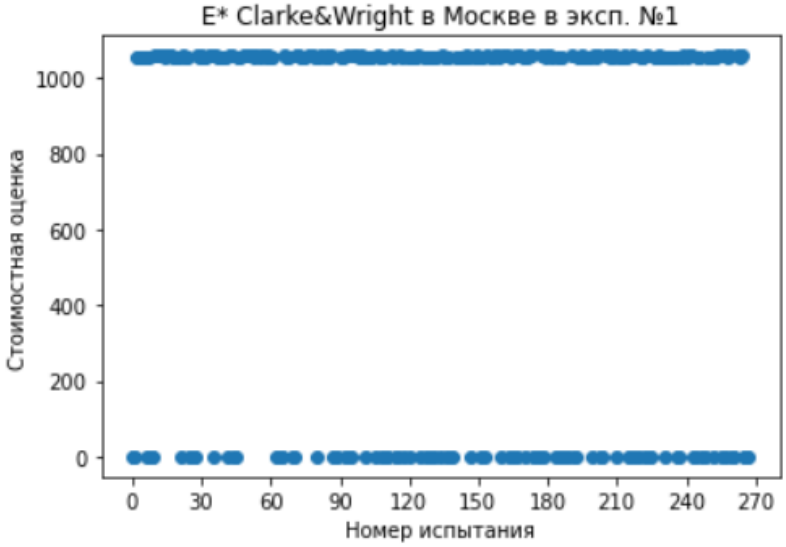


Рисунок Д.10. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №1

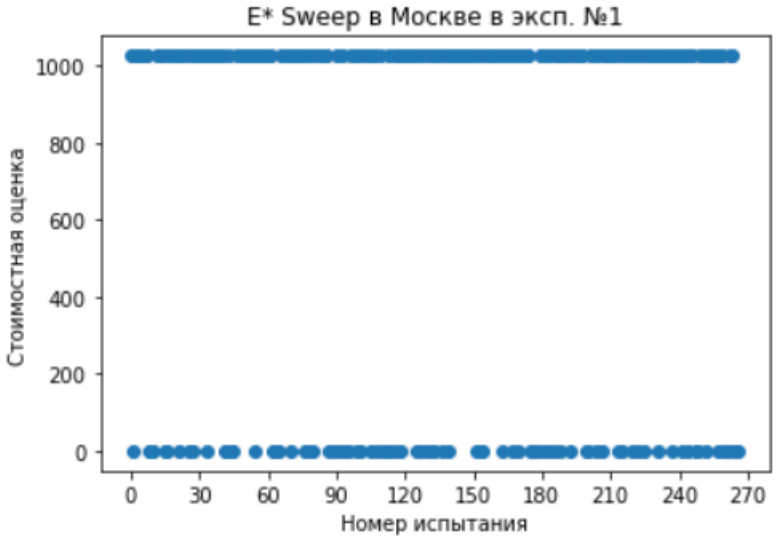


Рисунок Д.11. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме Sweep в эксперименте №1

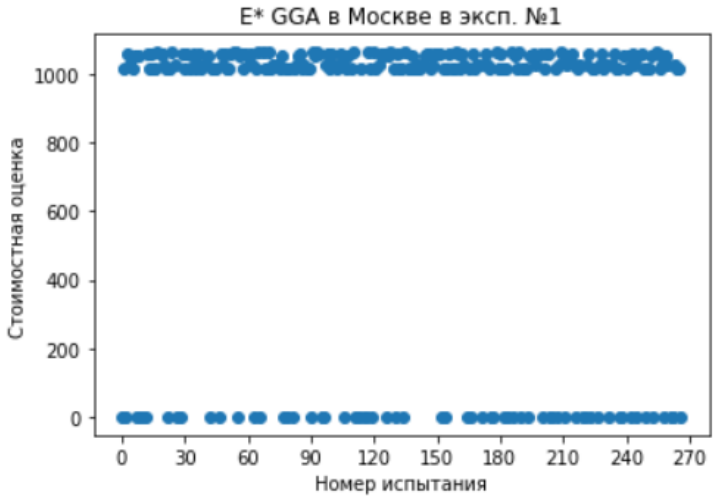


Рисунок Д.12. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме GGA в эксперименте №1

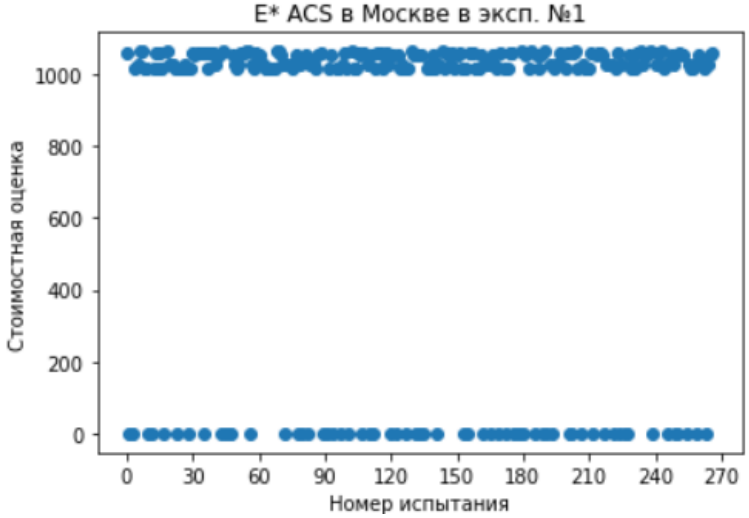


Рисунок Д.13. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме ACS в эксперименте №1

Рисунок Д.14. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №1

Рисунок Д.15. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме Sweep в эксперименте №1

Рисунок Д.16. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме GGA в эксперименте №1

Рисунок Д.17. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме ACS в эксперименте №1

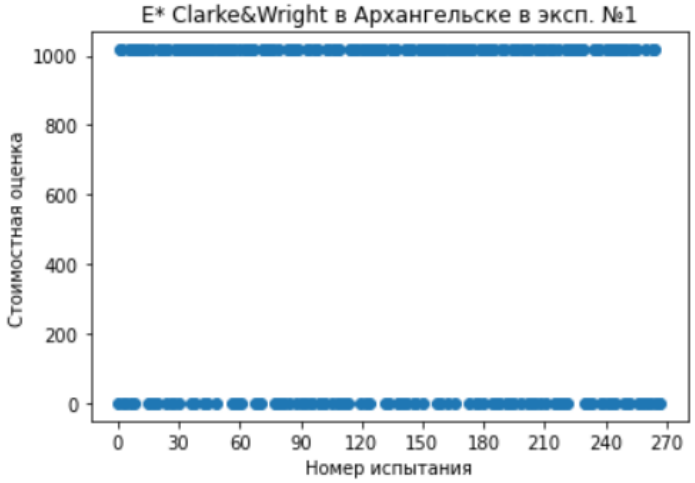


Рисунок Д.18. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №1

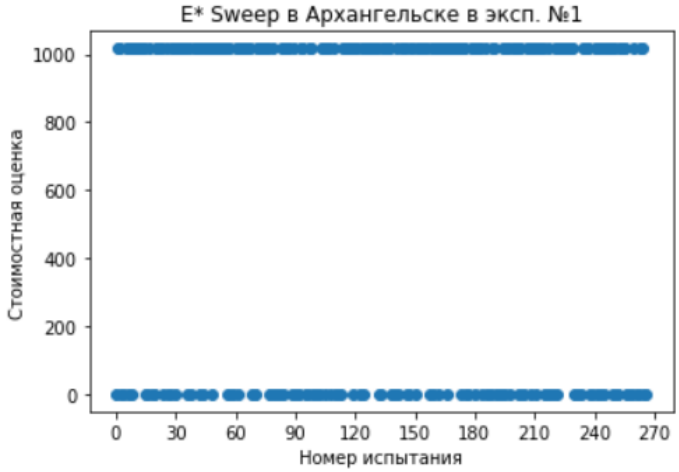


Рисунок Д.19. Стоимостные оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме Sweep в эксперименте №1

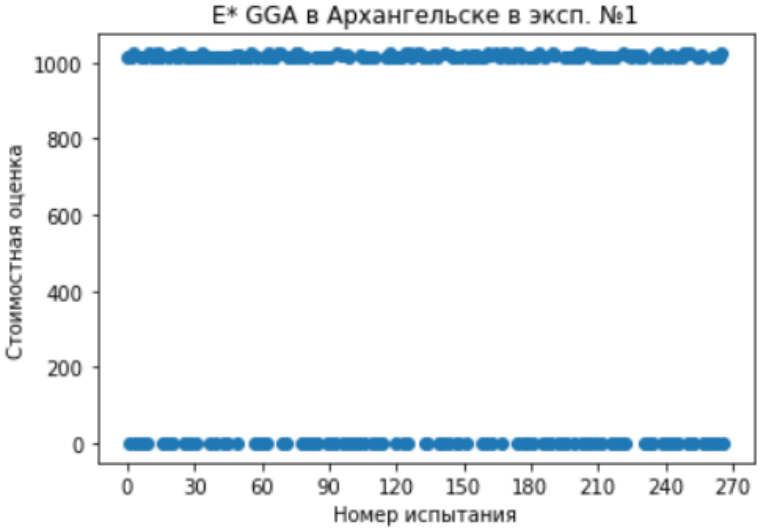


Рисунок Д.20. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме GGA в эксперименте №1

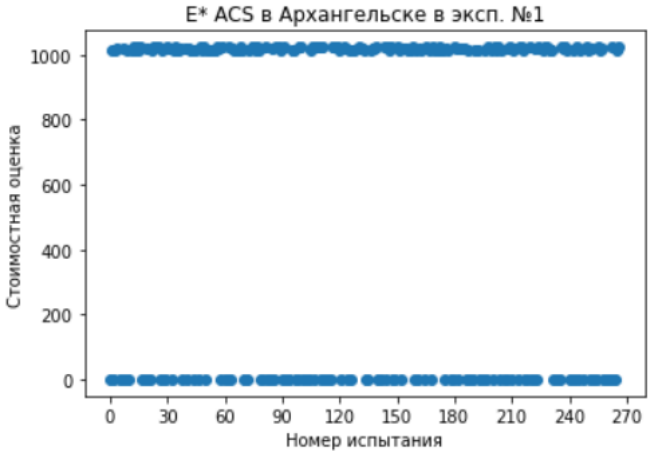


Рисунок Д.21. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме ACS в эксперименте №1

Рисунок Д.22. Индикаторы дождя в Москве за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.23. Индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.24. Индикаторы дождя в Архангельске за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.25. Индикаторы снега в Москве за 2023 год в эксперименте №2

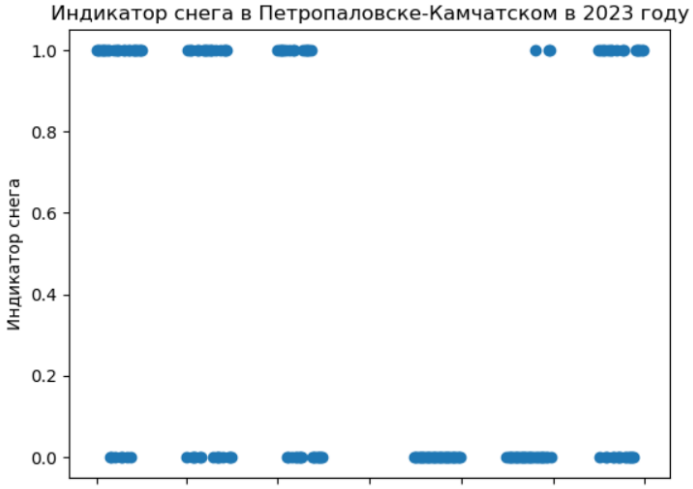


Рисунок Д.26. Индикаторы снега в Петропавлоске-Камчатском за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.27. Индикаторы снега в Архангельске за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.28. Индикаторы облачности в Москве за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.29. Индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.30. Индикаторы облачности в Архангельске за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.31. Индикатор температуры в Москве за 2023 год в эксперименте

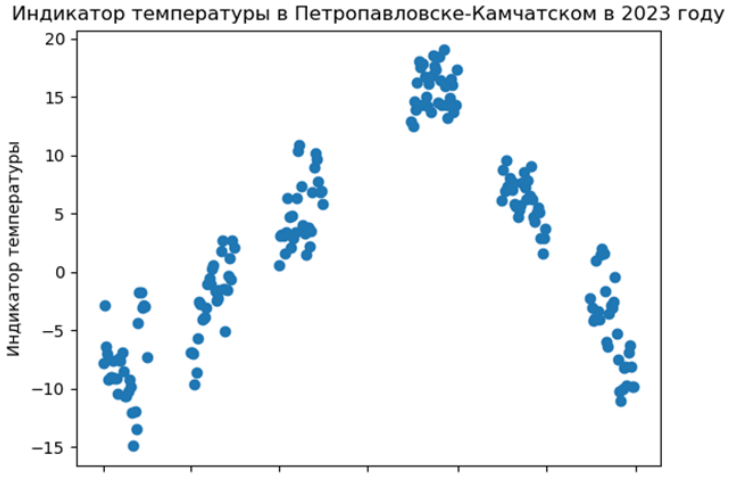


Рисунок Д.32. Индикатор температуры в Петропавловске-Камчатском за 2023 год в эксперименте №2

Рисунок Д.33. Индикатор температуры в Архангельске за 2023 год в эксперименте №2

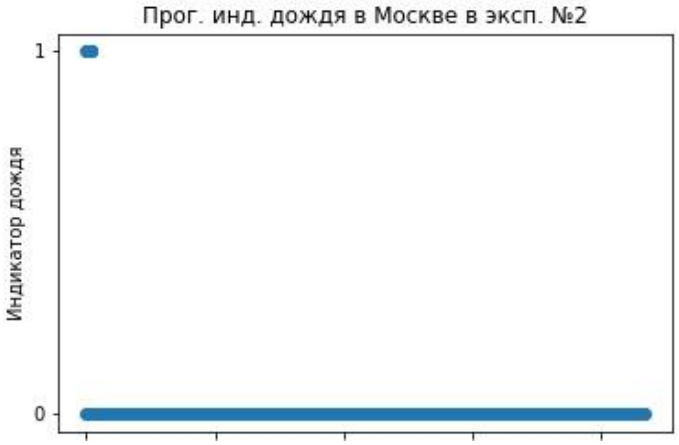


Рисунок Д.34. Прогнозные индикаторы дождя в Москве в эксперименте №2

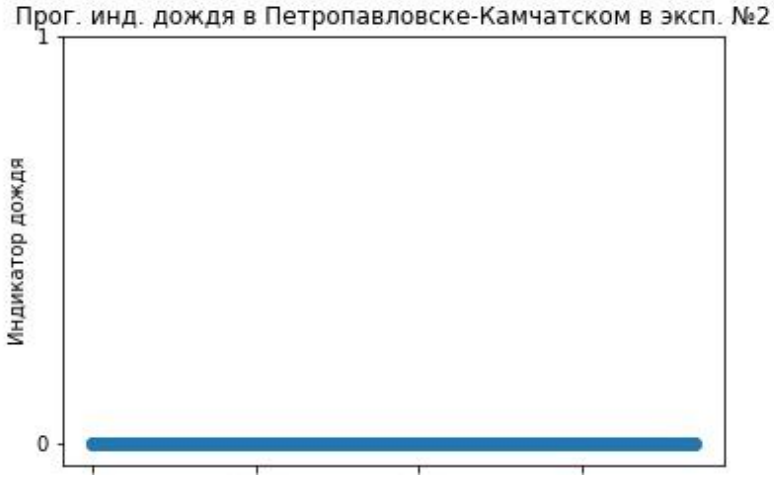


Рисунок Д.35. Прогнозные индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

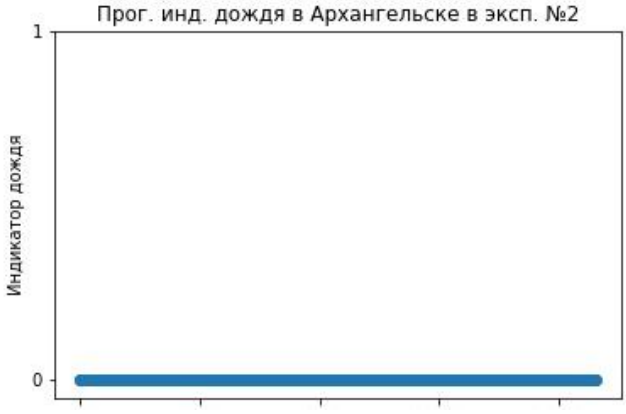


Рисунок Д.36. Прогнозные индикаторы дождя в Архангельске в эксперименте №2

Рисунок Д.37. Прогнозные индикаторы снега в Москве в эксперименте №2

Рисунок Д.38. Прогнозные индикаторы дождя в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

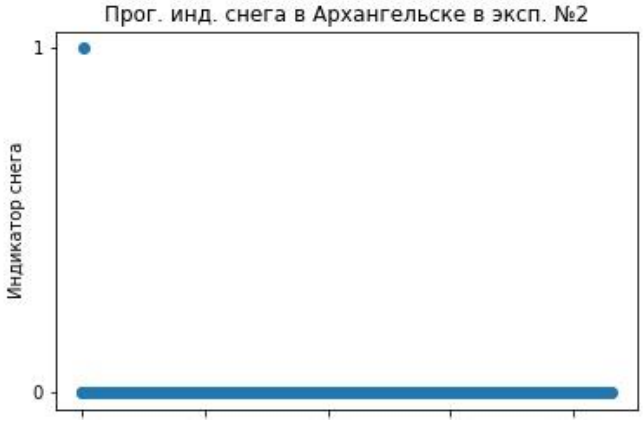


Рисунок Д.39. Прогнозные индикаторы снега в Архангельске в эксперименте №2

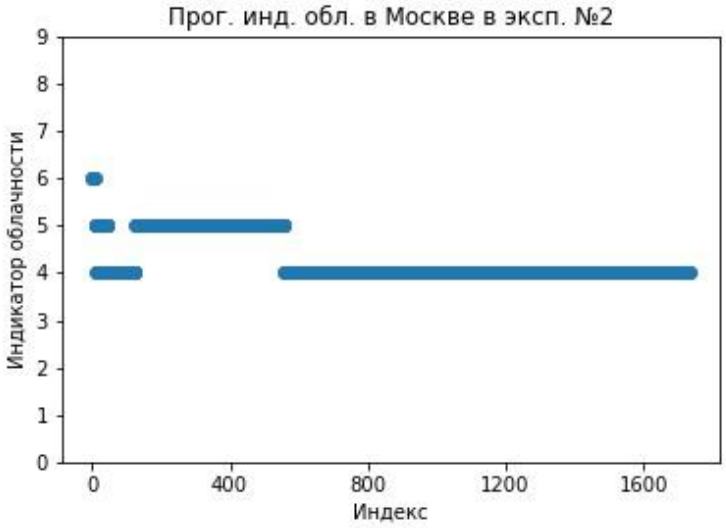


Рисунок Д.40. Прогнозные индикаторы облачности в Москве в эксперименте №2

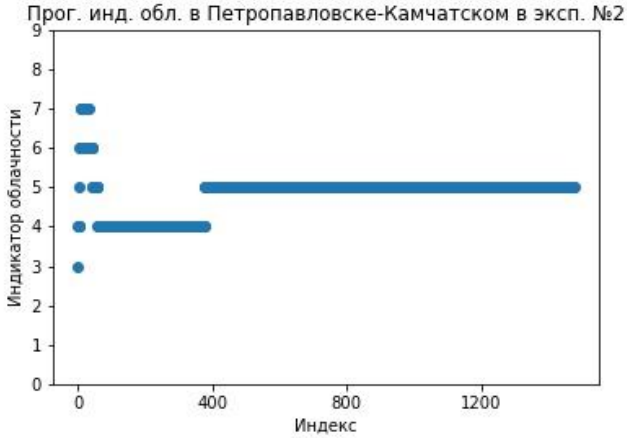


Рисунок Д.41. Прогнозные индикаторы облачности в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

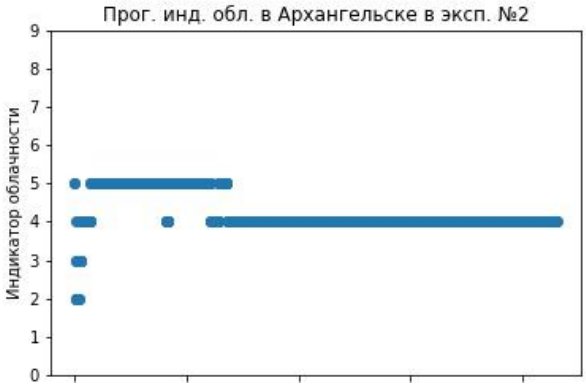


Рисунок Д.42. Прогнозные индикаторы облачности в Архангельске в эксперименте №2

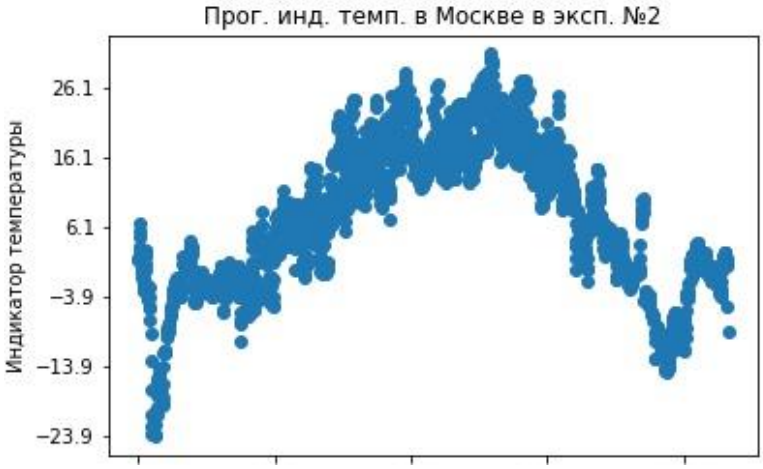


Рисунок Д.43. Прогнозные индикаторы температуры в Москве в эксперименте №2

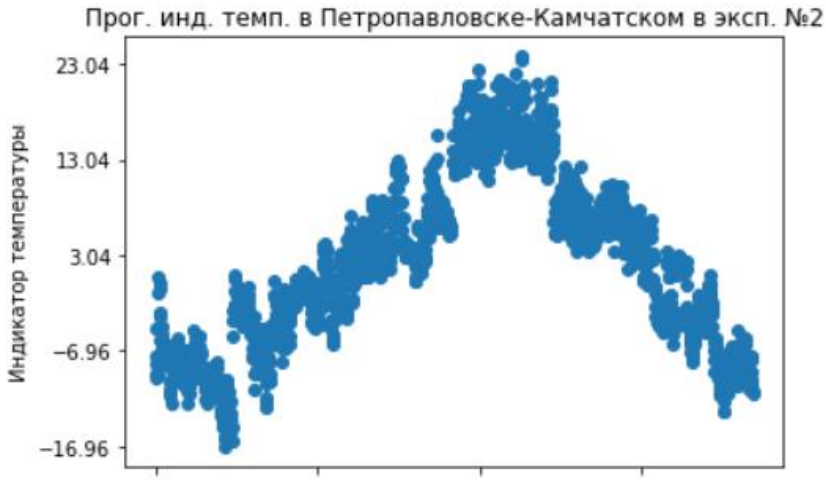


Рисунок Д.44. Прогнозные индикаторы температуры в Петропавловске-Камчатском в эксперименте №2

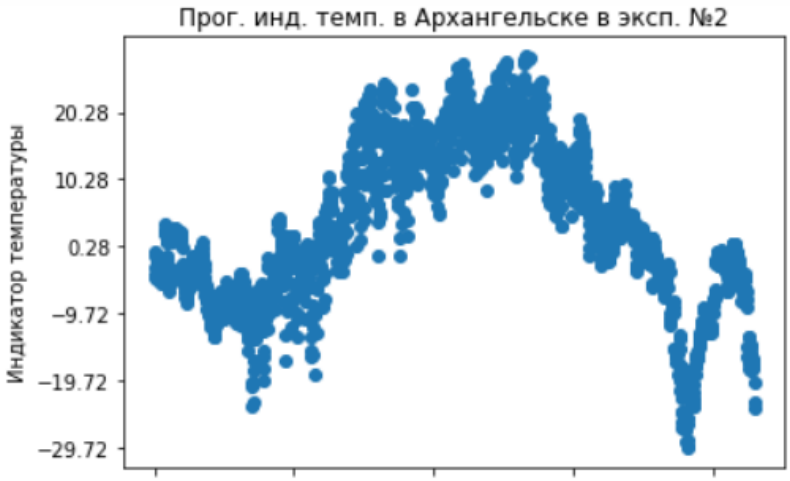


Рисунок Д.45. Прогнозные индикаторы температуры в Архангельске в эксперименте №2

Рисунок Д.46. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №1 в эксперименте №2

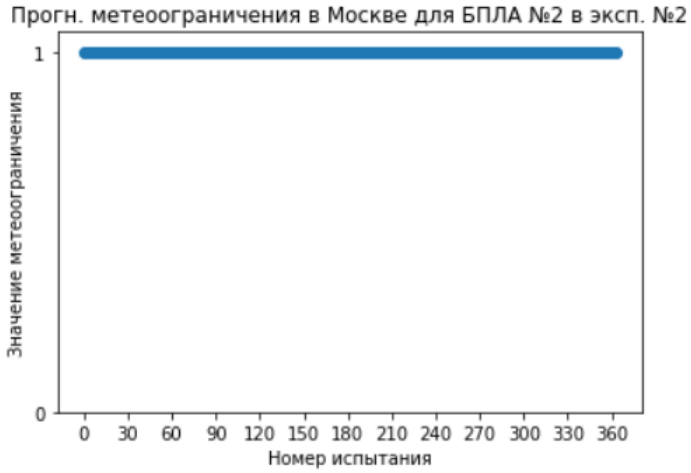


Рисунок Д.47. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №2 в эксперименте №2

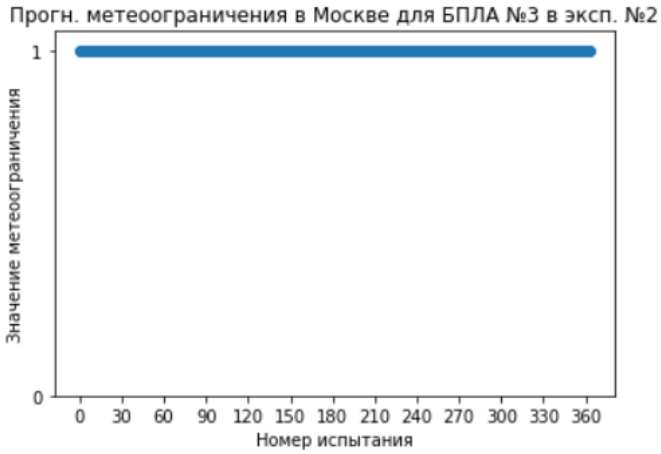


Рисунок Д.48. Прогнозные метеорологические ограничения в Москве для БПЛА №3 в эксперименте №2

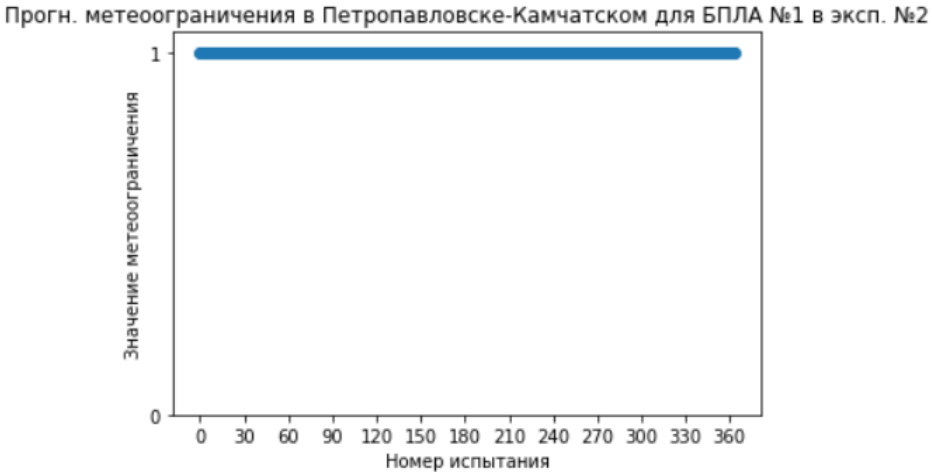


Рисунок Д.49. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №1 в эксперименте №2

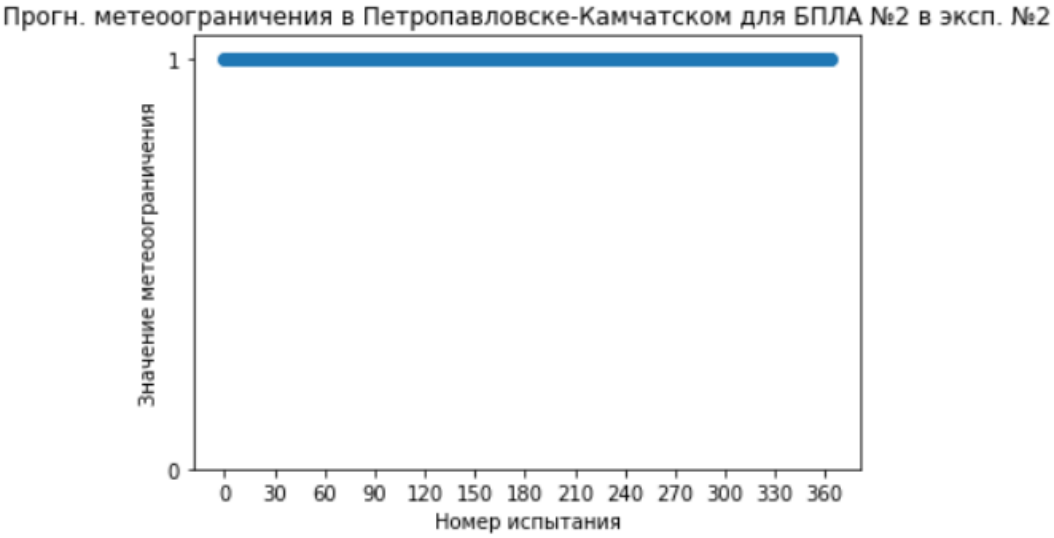


Рисунок Д.50. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №2 в эксперименте №2

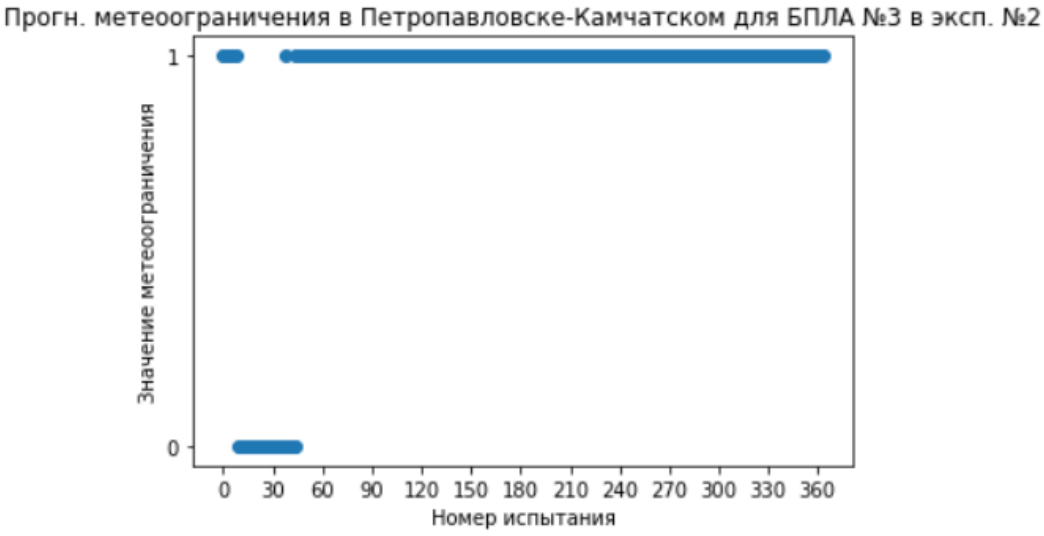


Рисунок Д.51. Прогнозные метеорологические ограничения в Петропавловске-Камчатском для БПЛА №3 в эксперименте №2

Рисунок Д.52. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №1 в эксперименте №2

Рисунок Д.53. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №2 в эксперименте №2

Рисунок Д.54. Прогнозные метеорологические ограничения в Архангельске для БПЛА №3 в эксперименте №2

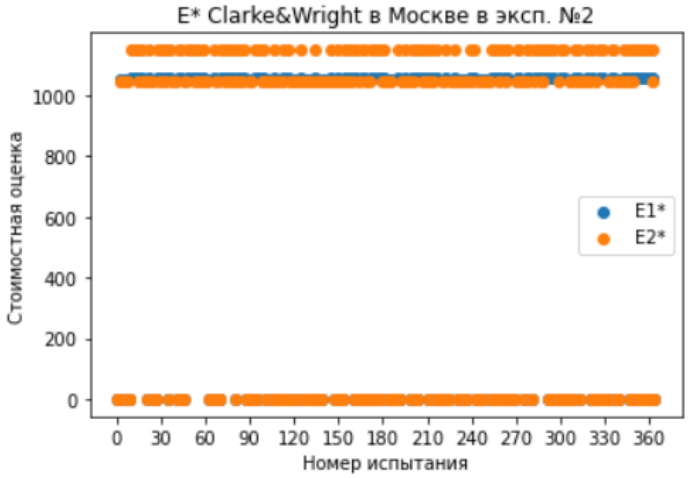


Рисунок Д.55. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №2

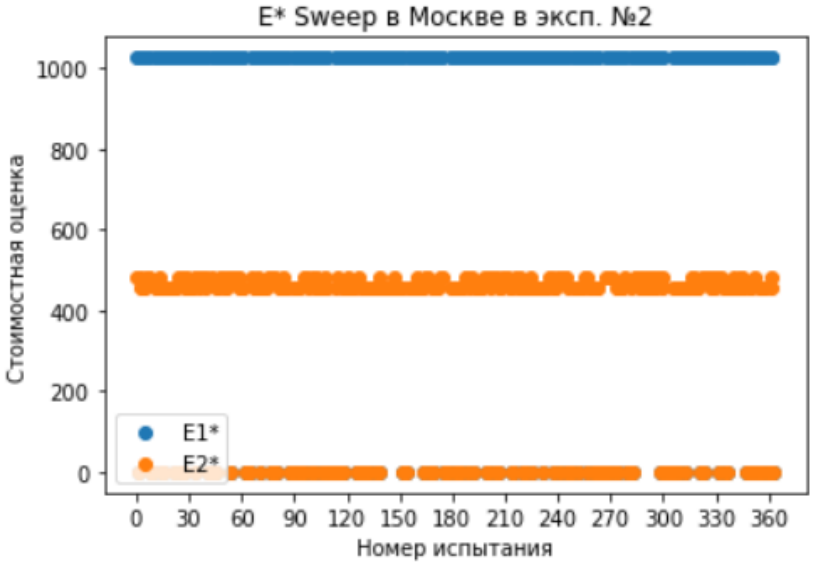


Рисунок Д.56. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме Sweep в эксперименте №2

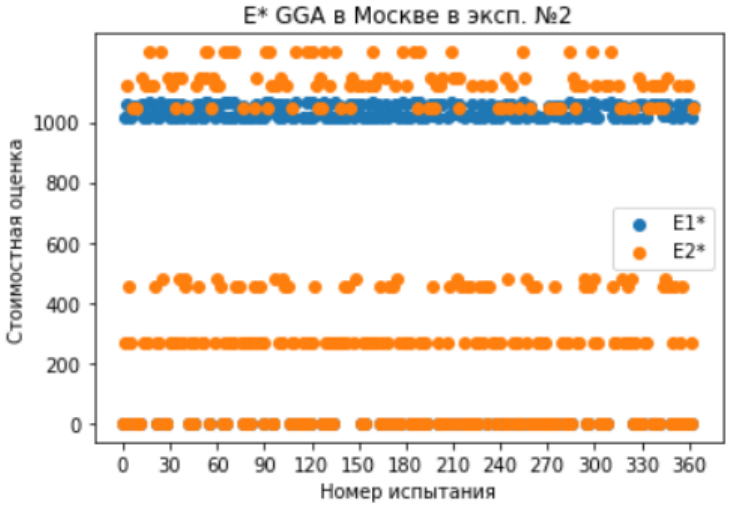


Рисунок Д.57. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме GGA в эксперименте №2

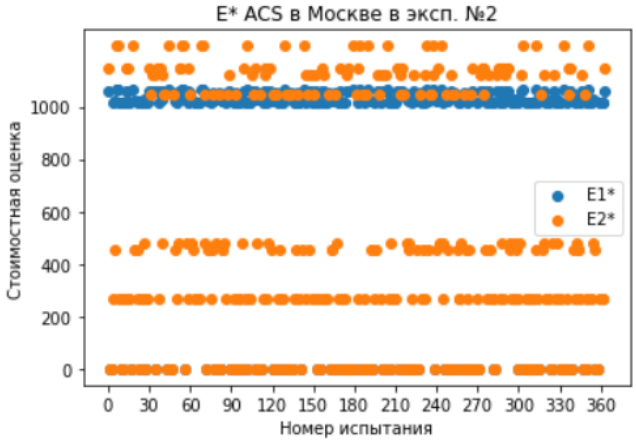


Рисунок Д.58. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Москве при алгоритме ACS в эксперименте №2

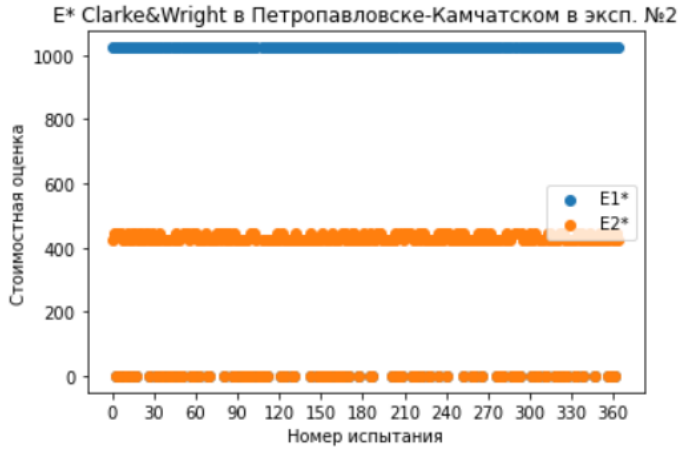


Рисунок Д.59. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №2

Рисунок Д.60. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме Sweep в эксперименте №2

Рисунок Д.61. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме GGA в эксперименте №2

Рисунок Д.62. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Петропавловске-Камчатском при алгоритме ACS в эксперименте №2

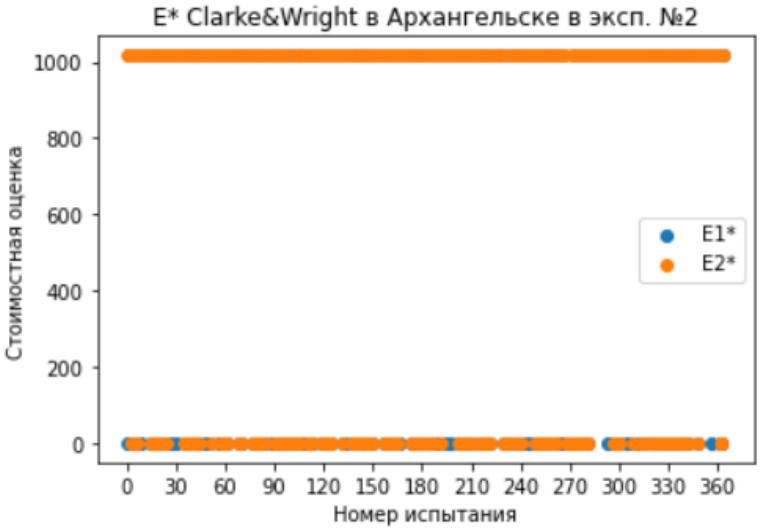


Рисунок Д.63. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме The Clarke&Wright в эксперименте №2

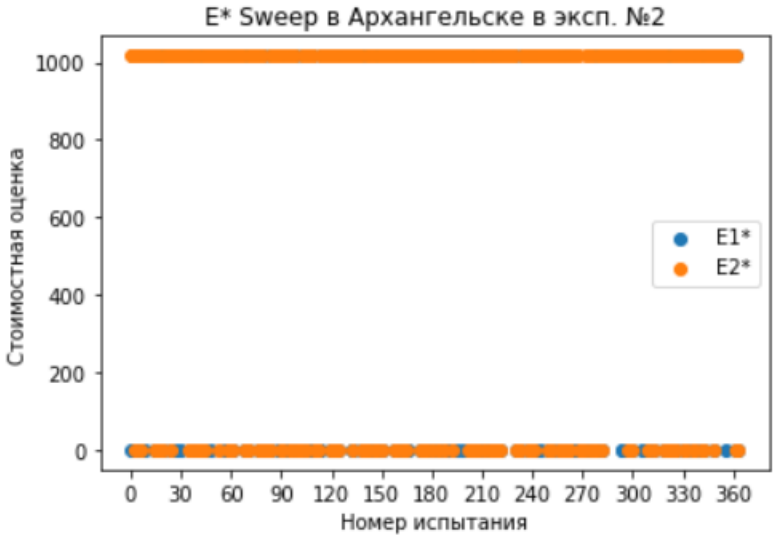


Рисунок Д.64. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме Sweep в эксперименте №2

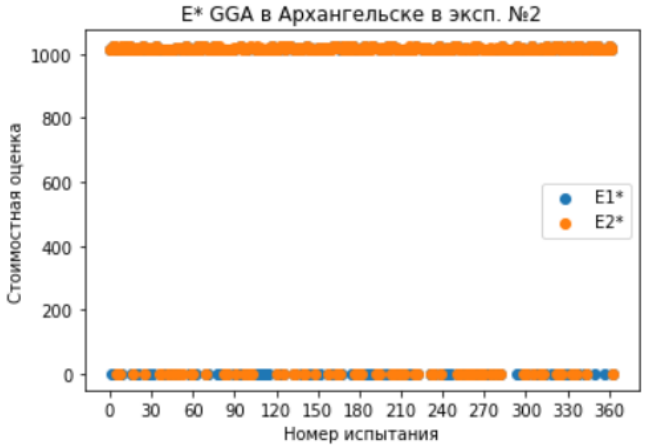


Рисунок Д.65. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме GGA в эксперименте №2

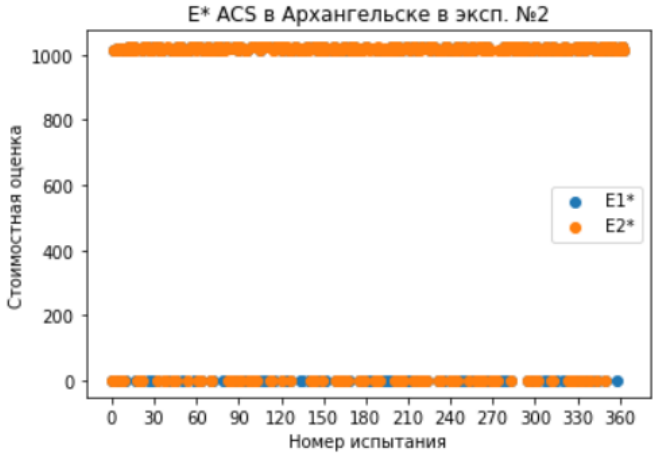


Рисунок Д.66. Показатели стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА в Архангельске при алгоритме ACS в эксперименте №2

Таблица Д.3 - Результаты применения алгоритма распределения транспортных средств для Москвы в эксперименте №2

y	u_y^r	u_y^s	u_y^c	u_y^T	E_{1y}^*, руб.	E_{2y}^*, руб.
1	1	0	2	2.60	0.00	0.00
2	1	0	1	5.42	0.00	0.00
3	0	0	6	4.38	1015.00	1015.00
…	…	…	…	…	…	…
1459	1	0	6	1.01	0.00	1058.96
1460	1	0	7	18.38	0.00	1063,13
Среднее	-	-	-	-	595.00	740.91
Дисперсия	-	-	-	-	264600.80	220593.50

Таблица Д.4 - Результаты применения алгоритма распределения транспортных средств для Петропавловска-Камчатского в эксперименте №2

y	u_y^r	u_y^s	u_y^c	u_y^T	E_{1y}^*, руб.	E_{2y}^*, руб.
1	0	0	6	16.27	1022.69	1022.69
2	0	0	8	11.69	1023.71	1023.71
3	0	0	7	6.01	1023.71	1023.71
…	…	…	…	…	…	…
1459	1	0	9	-2.30	1024.88	1024.88
1460	1	0	5	2.40	1015,00	1015.00
Среднее	-	-	-	-	666.62	809.10
Дисперсия	-	-	-	-	237306.20	172290.30

Таблица Д.5 - Результаты применения алгоритмов распределения транспортных средств для Архангельска в эксперименте

y	u_y^r	u_y^s	u_y^c	u_y^T	E_{1y}^*, руб.	E_{2y}^*, руб.
1	1	0	2	14.30	0.00	1017.22
2	0	0	4	0.06	1016.96	1016.96
3	0	0	7	-13.24	1016.96	1016.96
…	…	…	…	…	…	…
1459	1	0	5	0.25	0,00	0.00
1460	0	0	4	0.52	1018.70	1018.70
Среднее	-	-	-	-	624.57	754.11
Дисперсия	-	-	-	-	245718.20	198812.50

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНСТИТУТ ИМЕНИ Н.Е.ЖУКОВСКОГО»
[ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е.Жуковского»]
Юридический адрес: ул. Жуковского, д. 1, г. Жуковский, Московская область, 140180
Почтовый адрес: ул. Викторенко д. 7, Москва, 125319
ОГРН 1155040005889, ИНН 5040136208, КПП 504001001

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель генерального
директора ФГБУ «НИЦ «Институт
имени Н.Е.Жуковского»

В.С.Шапкин

«___» _____ 2024 г.

Акт

О внедрении результатов диссертационной работы
Саломатина Александра Александровича

Комиссия в составе:

Председатель: Кутахов В.П., директор проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», профессор, доктор технических наук

Члены комиссии:

Настас Г.Н., начальник отделения радиоэлектронных систем и функциональных нагрузок проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», кандидат технических наук.

Попов А.П., старший научный сотрудник проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы», кандидат технических наук.

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы «Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации», выполненной Саломатиным А.А., используются в деятельности ФГБУ НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» в работах по формализации оценки эффективности транспортировки грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

В НИР «Формирование системы исходных данных для определения требований к летно-техническим характеристикам транспортных беспилотных летательных аппаратов в составе авиационной транспортной системы на основе

проведения летного эксперимента» (2021 г., рег. № 121112200279-8) предложенное алгоритмическое и информационное обеспечение позволяет визуализировать и симулировать полет группы БПЛА при транспортировке грузов по рассчитанному оптимальному (рациональному) сценарию транспортировки грузов. Эффект при принятии решений лица принимающего решение до 20% от среднего времени принятия решений по формированию плана полетов.

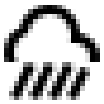
Председатель: В.П. Кутахов

Члены комиссии: Г.Н. Настас

А.П. Попов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Данные проводимых экспериментов для разработанного информационного обеспечения

Таблица Ж.1 - Исходные изображения для работы ядра визуализации/симуляции в эксперименте

Наименование	Изображение
БПЛА (1-ый вариант)	
БПЛА (2-ой вариант)	
БПЛА (3-ий вариант)	
Ненулевой прогнозный индикатор дождя	
Ненулевой прогнозный индикатор снега	
Ненулевой прогнозный индикатор облачности	
Источник/промежуточный пункт	
Сток	

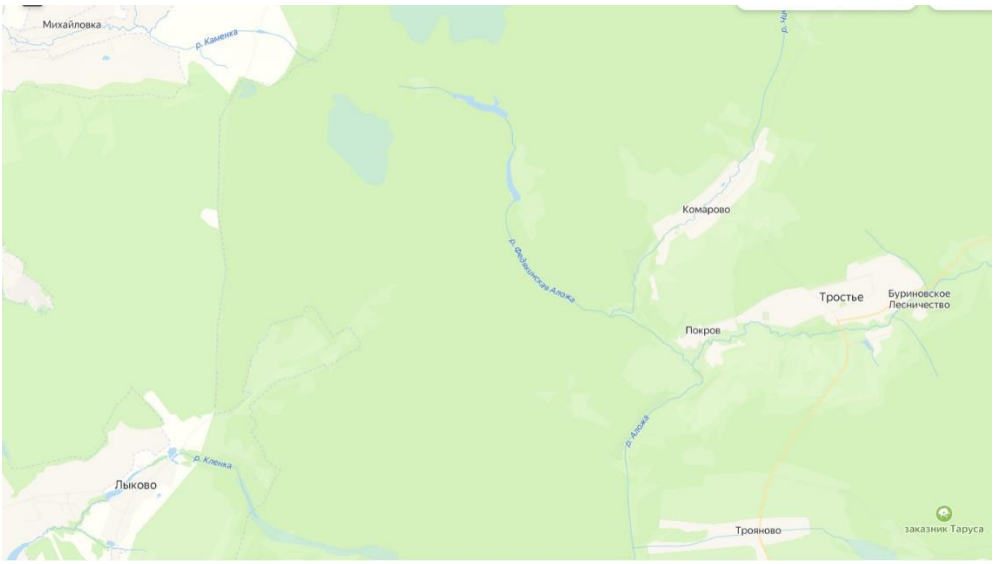


Рисунок Ж.1. Карта местности района №2 (около Москвы) в эксперименте

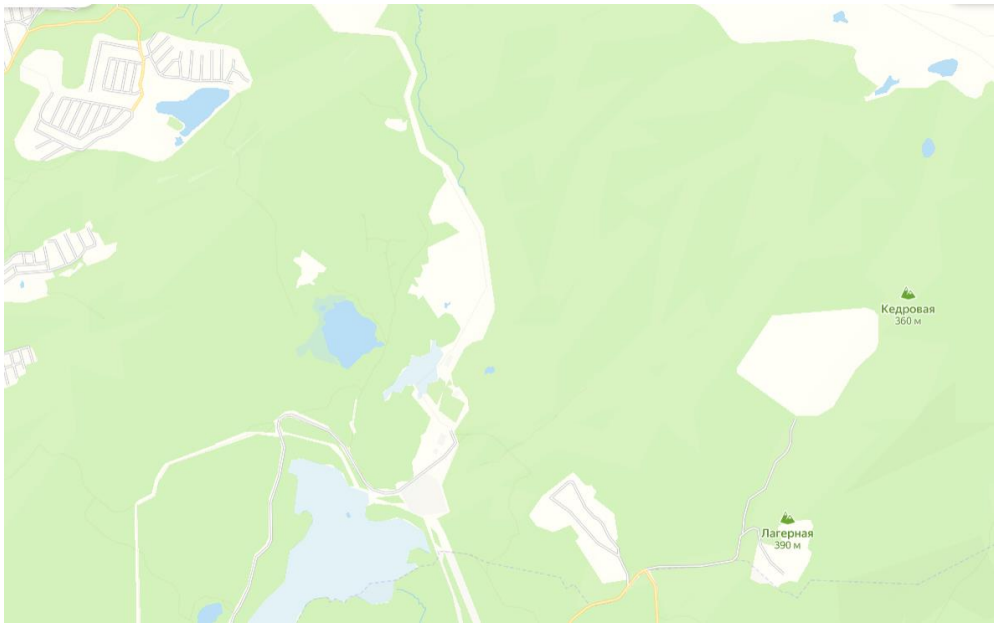


Рисунок Ж.2. Карта местности района №2 (около Петропавловска-Камчатского) в эксперименте

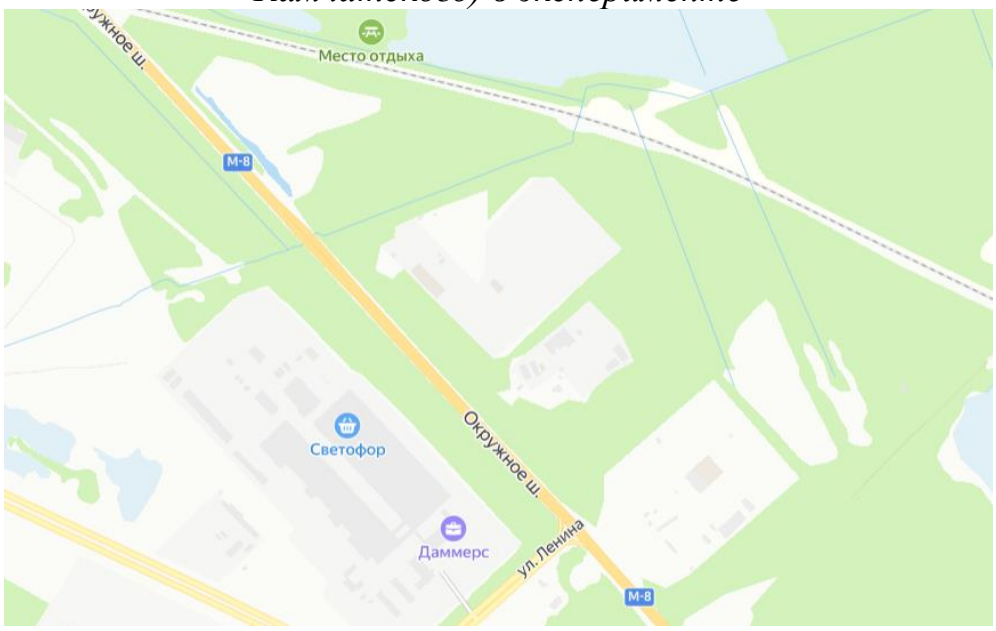


Рисунок Ж.3. Карта местности района №3 (около Архангельска) в эксперименте

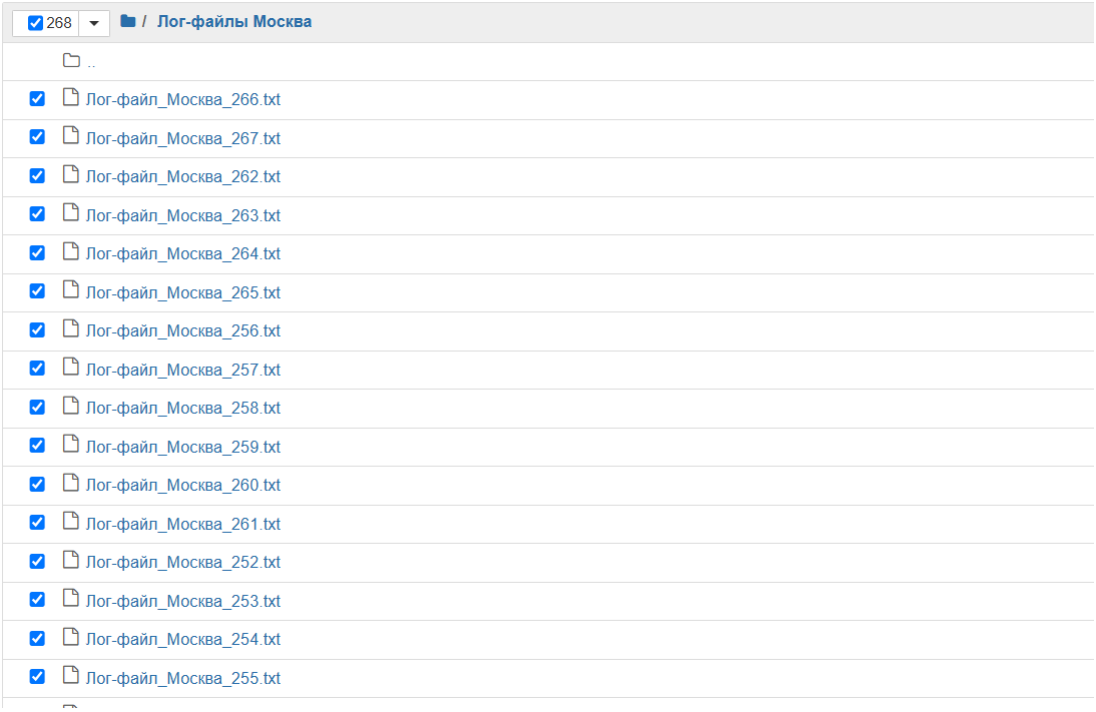


Рисунок Ж.4. Лог-файлы, полученные на основе верифицированных расчетов для Москвы в эксперименте №1

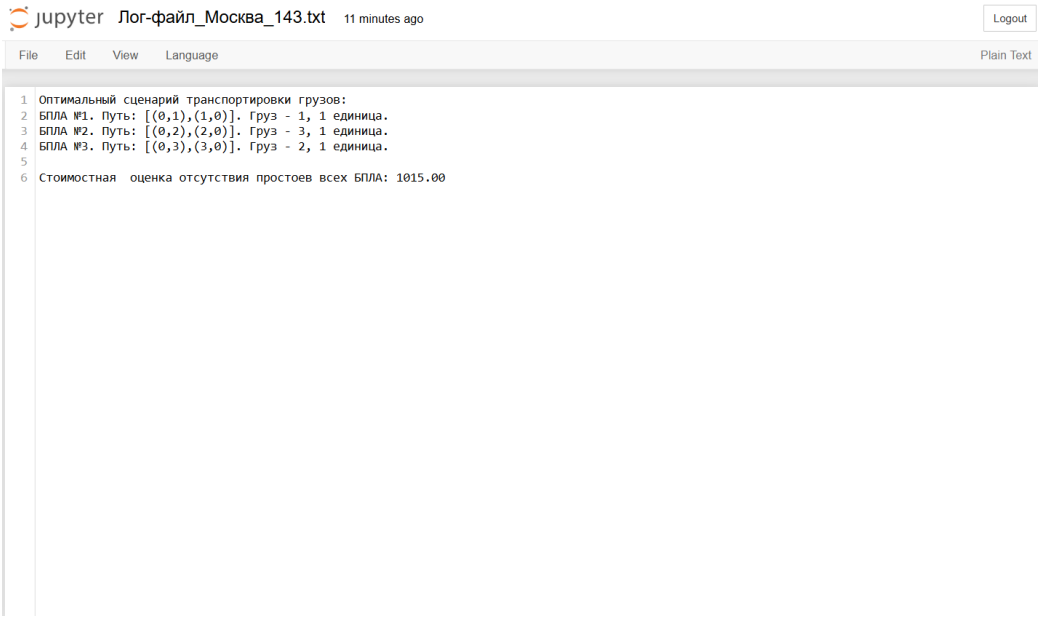


Рисунок Ж.5. Пример информации лог-файла в эксперименте №1

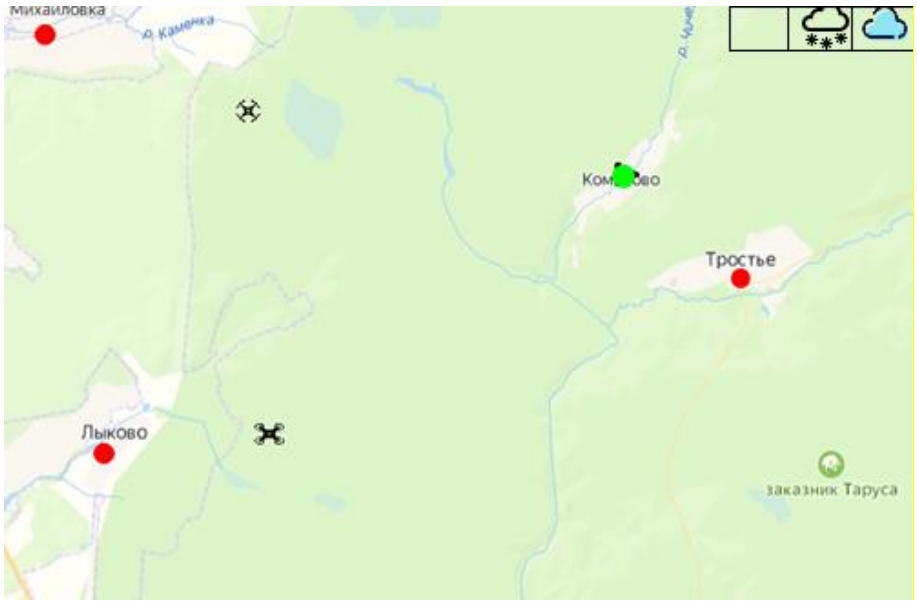


Рисунок Ж.6. Пример симуляции в GAMA в эксперименте

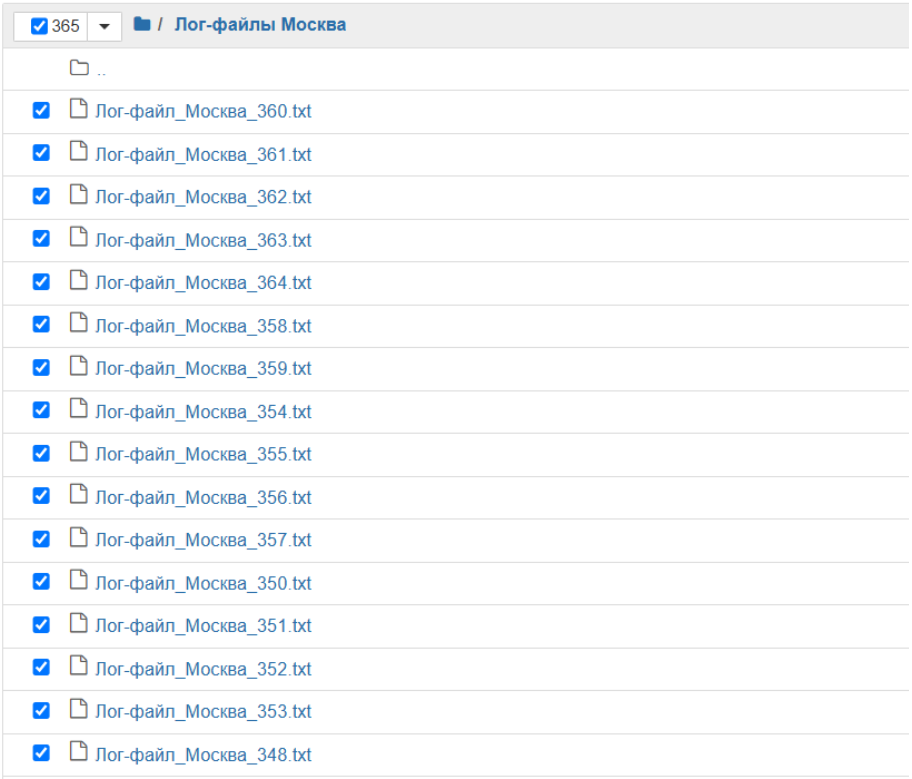


Рисунок Ж.7. Лог-файлы, полученные на основе верифицированных расчетов для Москвы в эксперименте №2