

На правах рукописи



Саломатин Александр Александрович

**Автоматизированная информационная система
поддержки принятия решений
о распределении группы БПЛА
при транспортировке грузов с учетом
метеорологической информации**

Специальность 2.3.8 —
«Информатика и информационные процессы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии науки (ИПУ РАН).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мещеряков Роман Валерьевич

Официальные оппоненты: **Бобырь Максим Владимирович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры программной инженерии
Юго-западного государственного
университета.

Смирнов Владимир Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладные программные
средства и математические методы»
Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-
технический институт (национальный
исследовательский университет)»

Защита состоится 12 мая 2025 года на заседании Диссертационного совета 24.1.107.03 при Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук и на сайте www.ipu.ru.

Автореферат разослан _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.107.03
д.т.н., доцент

Е.А. Барабанова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Процессы организации и управления транспортно-экспедиционной деятельностью для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) постоянно совершенствуются. Происходит повсеместная цифровизация транспортной отрасли в соответствии с положениями программы цифровой экономики Российской Федерации до 2035 г. В связи с этим активно разрабатываются и развиваются автоматизированные информационные системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов. Принятие решения в системах происходит на основе информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов, который учитывает метеорологические условия полетов БПЛА, и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА. При неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы сбор и обработка информации с датчиков о наличии дождя, снега, высоте нижней границы облачности и температуре могут быть нарушены, что приведет к снижению достоверности информации, необходимой для поддержки принятия решения.

Решением проблемы служит оперативная подмена отсутствующих в автоматизированной метеорологической измерительной системе метеорологических параметров прогнозными значениями, рассчитанными методами прогностической обработки метеорологической информации. Более того, необходимо разработать информационное и алгоритмическое обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов, учитывающее метеорологическую информацию, содержащее обновленные методы и средства сбора и обработки информации, а также алгоритмы для поиска рационального сценария транспортировки грузов.

Степень разработанности темы. Разработке эффективного алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированных информационных систем поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации посвящены российские и зарубежные исследования, проводимые Захаровой А.А., Кутаховым В.П., Мещеряковым Р.В., Подвесовским А.Г., Смолиным А.Л., Моисеевым Д.В., Мозолевым Л.А., Wang F., Yang H., Laporte G., Semet F., Kosasih W и др. Разработке автоматизированных метеорологических измерительных систем посвящены исследования Болелова Э.А., Медведева Д.А., Геращенко Л.А., Данилова А.Д. и др. Исследования Астапенко П.Д., Баранова А.М., Шварева И.М., Антохина Е.А и др. подтверждают важность обработки информации о наличии дождя, снега,

высоте нижней границы облачности и температуре для данных систем.

Исследования Мирсаевой Н.А., Батыревой О.В., Вильфанда Р.М., Лукияновой Л.Е., Тищенко В.А., Юдина М.И. посвящены методам прогностической обработки метеорологической информации.

Таким образом, существует потребность в разработке алгоритмического и информационного обеспечения автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации и метода обработки метеорологической информации в автоматизированной метеорологической измерительной системе.

Объектом исследования является автоматизированная информационная система поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Предметом исследования являются информационные процессы в автоматизированной информационной системе поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

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

Достижение поставленной цели потребовало решение следующих **задач**:

- провести анализ предметной области в части необходимости разработки автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации;
- разработать информационное обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации;
- разработать метод обработки метеорологической информации для автоматизированной метеорологической измерительной системы, включающий оперативную прогностическую обработку информации при неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной системы;
- разработать алгоритмическое обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом

метеорологической информации;

- провести оценку результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов.

Методология и методы исследования. При проведении исследований были использованы элементы теории множеств, нечеткой логики, теории графов, эвристические и метаэвристические методы, методы экстраполяции. Оценки результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения в проводимых вычислительных экспериментах подтверждают теоретические исследования.

Научная новизна состоит в разработке:

- информационного обеспечения автоматизированной информационной системы 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 автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы, 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 автоматизированной метеорологической измерительной системе, отличающегося от существующих оперативной прогностической обработкой информации в неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной системы и формирующего необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры. (п. 7, 16 паспорта специальности 2.3.8);
- алгоритмического обеспечения автоматизированной информационной системы 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 автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы, 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 (п. 6, 16 паспорта специальности 2.3.8).

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

Практическая значимость. Разработанное алгоритмическое и информационное обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации может быть использовано всеми, кто занимается транспортировкой грузов в следующих областях: 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).

Положения, выдвигаемые для защиты, состоят в том, что разработан(-о):

- информационное обеспечение автоматизированной информационной системы 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 автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы, 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 автоматизированной метеорологической измерительной системе, включающий оперативную прогностическую обработку информации в неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной системы, который формирует необходимые для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметры;
- алгоритмическое обеспечение автоматизированной информационной системы 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 автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы, которое улучшает поддержку принятия решений 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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа выполнена по 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.)

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

Апробация 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).

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» (№ 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).

Личный вклад. Основные научные результаты получены лично автором. Постановка задачи исследования осуществлялась совместно с научным руководителем профессором Мещеряковым Р. В.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 13 научных статьях, в том числе в 3 публикациях в изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, 3 статьях из перечня научных изданий, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и/или Scopus, а также в 7 рецензируемых изданиях.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Основная часть работы изложена на 185 страницах, содержит 32 иллюстрации, 19 таблиц. Список цитируемой литературы включает 131 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, раскрыта практическая

значимость и новизна работы, приведена краткая структура диссертации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ предметной области в части необходимости разработки автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

Постановка задачи планирования и оптимизации транспортировки грузов выглядит следующим образом:

$$E(X, T^S, T^D, R^*, Z) \rightarrow \max, X \in X_F, \quad (1)$$

где E — эффективность сценариев транспортировки грузов по выбранному множеству показателей;

X — искомый сценарий транспортировки грузов;

X_F — множество допустимых сценариев транспортировки грузов;

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

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

$R^* = \langle S, D, Q, \Gamma, C, U \rangle$ — маршрутная сеть, определяемая множествами: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{k_1}\}$, $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{k_2}\}$, $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{k_3}\}$ источников, стоков и промежуточных пунктов соответственно с их характеристиками $SP_i (i=1, \dots, k_1)$, $DP_j (j=1, \dots, k_2)$, $QP_q (q=1, \dots, k_3)$; $\Gamma = \{\Gamma_f\}$ — картой (графом) маршрутов с привязкой к координатам; $C = \{\|C_f(A_l, Y_p)\|\}$ — множеством матриц, задающим затраты ресурсов из множества $Y = \{Y_p\}$ при использовании БПЛА A_l на маршруте Γ_f ; $U = \|U(A_l, \Gamma_f)\|$ — матрицей дополнительных ограничений маршрутной сети.

$Z = \|V(S_i \cup D_j \cup Q_r, A_l)\|$ — матрица распределения БПЛА различных типов по источникам, стокам и промежуточным пунктам.

При определении маршрутной сети учитываются также данные, такие как W^* — множество метеорологической информации, содержащее информацию о наличии дождя и снега, типе облачности, температуре, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{n^*}\}$ — множество, определяющего гетерогенную группу БПЛА с набором характеристик $AP_i (i=1, \dots, n^*)$, высота полета H , множество грузов различных типов G с соответствующими характеристиками.

Проведенный обзор и анализ существующих алгоритмов планирования и оптимизации транспортировки грузов определяет набор алгоритмов, доступных для включения в состав разрабатываемого алгоритмического обеспечения с учетом их особенностей применения.

Набор методов и средств сбора и обработки информации для

существующего информационного обеспечения автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации неразрывно связан с последовательным выполнением функциональных блоков: ввода исходных данных, вычислительного ядра, верификации результатов расчетов, формирования лог-файла, ядра визуализации/симуляции, вывода результатов/симуляции.

Схема функционирования автоматизированной метеорологической измерительной системы вместе с измерительными каналами, чья работоспособность может быть нарушена, представлена на рис. 1.

Отдельное внимание в первой главе уделено методам прогностической обработки метеорологической информации, применение которых полезно при разработке метода обработки метеорологической информации в автоматизированной метеорологической измерительной системе для формирования необходимых для анализа эксплуатантами БПЛА метеопараметров.

Во второй главе разработано информационное обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации, а также метод обработки метеорологической информации. К неблагоприятным условиям относятся возможные нарушения работоспособности измерительного канала особых явлений, облачности, температуры. Детально изложены способы масштабирования разработанного информационного обеспечения путем учета новых данных и модификаций отдельных модулей. В разработанном информационном обеспечении присутствуют новые методы и средства прогностической обработки метеорологической информации, которые поддерживают предоставление эффективной в части достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Разработанное информационное обеспечение в неблагоприятных условиях функционирования схематично представлено на рис. 2.

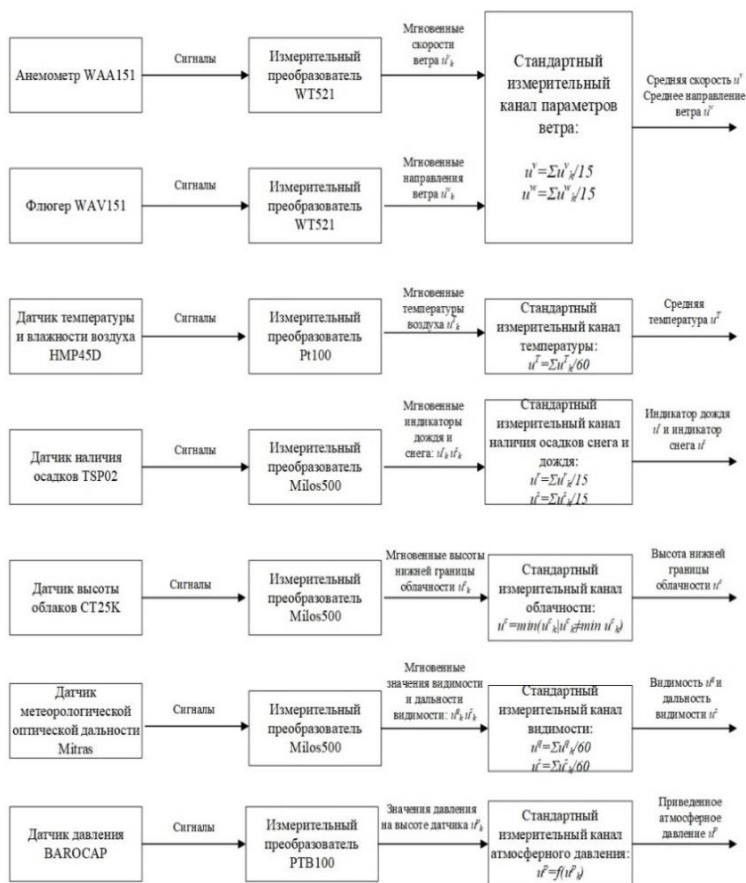


Рис. 1 - Общая структурная схема существующей автоматизированной метеорологической измерительной системы

Разработанный метод обработки информации состоит из нескольких действий. Вначале происходит измерение средней скорости и направления ветра, измерение видимости и дальности видимости, измерение приведенного атмосферного давления. В случае благоприятных условий функционирования с помощью датчиков также определяется наличие дождя и снега, средняя температура и высота нижней границы облачности. В случае неблагоприятных условий функционирования недостающие метеопараметры получают путем прогнозирования на основе статистической информации, хранимой в базе данных.

Рассмотрим подробнее последний случай. При неблагоприятных

условиях функционирования в разработанном методе происходит обработка информации о явлениях e_i , хранимой в базе данных в виде n значений, с помощью операции ограничения (выбора) отношения по некоторому условию, с целью выделения значений:

r_i , определяющих наличие дождя:

$$r_i = I("дождь" \in e_i); \quad (2)$$

s_i , определяющих наличие снега:

$$s_i = I("снег" \in e_i), \quad (3)$$

где I — индикатор, принимающий значение 1 или 0, указывающий на наличие или отсутствие соответствующих осадков в момент времени, задаваемый индексом i .

Далее, индикатор дождя u^r определяется в оперативном режиме с помощью некоторых формул статистического прогнозирования:

при среднем уровне ряда динамики следующим образом:

$$u^r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \right], \quad (4)$$

при среднем абсолютном приросте в соответствии с формулой:

$$u^r = \left[r_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (r_{i+1} - r_i)}{n - 1} \right], \quad (5)$$

при среднем темпе роста в соответствии с формулой:

$$u^r = \left[r_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_{i+1}}{r_i}}{n - 1} \right]. \quad (6)$$

Формулы, аналогичные (4) - (6), применимы также к прогнозированию наличия снега, высоты нижней границы облачности и температуры и приведены в тексте диссертационной работы, причем при обработке информации о температуре значения температур исходно являются числовыми, а при обработке информации об облачности – изначально определяют тип облака.

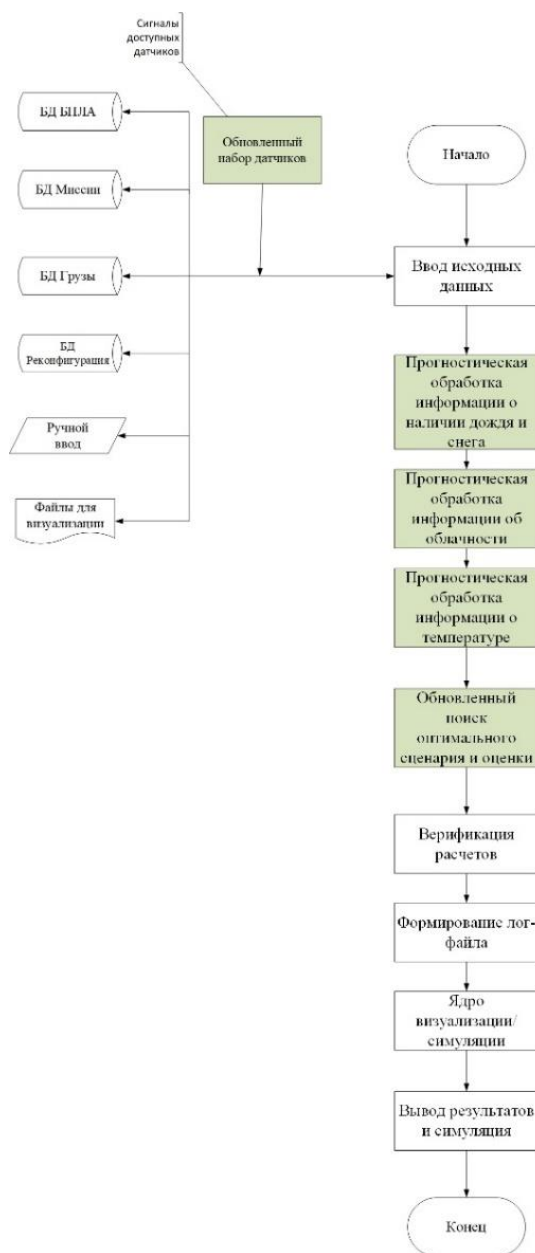


Рис. 2 - Схема информационного обеспечения в неблагоприятных условиях функционирования

Для прогнозирования высоты нижней границы облачности u^{*c} сначала определяют тип облака. Тип облаков l_i - перистый определяется следующей формулой:

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

где $I("Ci" \in c_i)$ – индикатор, принимающий значение 1 или 0, указывающий на наличие или отсутствие облачности типа “Сi” в момент времени, задаваемый индексом i . По аналогии с формулой (7) определяются другие типы облаков, где l_i принимает значения от 2 до 9, а отсутствие облачности задается нулевым типом.

В третьей главе разработано алгоритмическое обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. В дополнение к предыдущим неблагоприятным условиям функционирования рассматривается отсутствие учета влияния значений метеорологических параметров для остальных ненарушенных измерительных каналов в автоматизированной метеорологической измерительной подсистеме. Разработанное алгоритмическое обеспечение содержит алгоритм построения маршрутной сети и алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам. Дополнительно представлены доступные для внедрения алгоритмы и модификации частей используемых алгоритмов для масштабирования алгоритмического обеспечения. Предложенный алгоритм распределения транспортных средств по маршрутам находит рациональный сценарий транспортировки грузов X^* на основе выбора из сценариев, полученных с помощью известных алгоритмов: The Clarke&Wright, Sweep, GGA, ACS.

Пусть общее количество БПЛА равно K , число узлов маршрутной сети равно N , а $l(k)$ задает номер перелета k -ого БПЛА. Сценарий $X = \|x_{i,j,l(k)}^k\|$ ($k=1,...,K$; $i,j=1,...,N$; $l(k)=1, \dots, L_k$) представляет собой матрицу индикаторов выполнения k -м БПЛА перелета с номером $l(k)$ из i -го узла транспортной сети в j -й узел. Обозначим также T_{ij}^k ($k=1,...,K$; $i,j=1, \dots, N$) среднюю продолжительность перелета k -го БПЛА из i -го узла маршрутной сети в j -й узел, TP^k - время для выполнения операций по обслуживанию k -го БПЛА, перед вылетом и после завершения перелета, h_{ij}^k – индикатор допустимости перелета для k -го БПЛА. Для поиска рационального сценария X^* требуется минимизировать суммарные затраты на транспортировку груза в течение периода планирования T :

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)}^k \cdot T_{i,j}^k) \rightarrow \min, \quad (8)$$

при ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{i,i,l(k)}^k = 0 \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq 1 \\ \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)+1}^k \leq \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \\ \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq 1 - \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)+1}^k \cdot (1 - h_{i,j}^k)) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)=1}^k \cdot TP^k) + \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)}^k \cdot (T_{i,j}^k + TP^k)) \leq T \\ \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k = \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{j=1}^N x_{j,i,l(k)}^k \end{array} \right. \quad (9)$$

Показатель стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА $E(X^*)$ определяется по следующей формуле:

$$E(X^*) = C^*(X^*) + E_1^*(X^*), \quad (10)$$

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

$E_1^*(X^*)$ – показатель стоимостной оценки пребывания в полете БПЛА для найденного сценария X^* с учетом себестоимости летного часа для БПЛА, который определяется по формуле:

$$E_1^*(X^*) = \sum_{k=1}^K \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (v_{i5} * x_{i,j,l(k)}^{*k} \cdot T_{i,j}^k), \quad (11)$$

где v_{i5} – скорость i -го БПЛА.

Перед поиском распределения БПЛА по маршрутам необходимо построить маршрутную сеть с метеорологическими ограничениями. Используется алгоритм, формирующий прогнозные индикаторы наличия снега, дождя, высоты нижней границы облачности и температуры (см. рис. 3). Далее, при определении метеорологических ограничений сети проверяется ряд условий. Для беспрепятственной работы l -го БПЛА необходимо выполнение следующих условий:

с учетом индикатора дождя u^r :

$$r_{l2} \geq 3 \text{ при } u^r = 1, \quad (12)$$

с учетом индикатора снега u^s :

$$\begin{cases} r_{l2} \geq 3 \text{ при } u^s = 1 \\ r_{l1} \geq 4 \text{ при } u^s = 1 \end{cases} \quad (13)$$

с учетом индикатора облачности u^c :

$$H_l^{max} \geq H \text{ при } u^c \leq H \text{ и } 1 - P^{u^{**c}} \geq P_{min}, \quad (14)$$

с учетом индикатора температуры u^T :

$$T_{l1} \leq u^T \leq T_{l2}, \quad (15)$$

где r_{l1}, r_{l2} – первая и вторая характеристическая цифра кода IP для l -го БПЛА;

H_l^{max} – предельная высота полета в облаке для l -го БПЛА;

$P^{u^{**c}}$ – оценка вероятности вывода из строя в связи с облачностью;

P_{min} – минимально допустимая вероятность для полета l -го БПЛА;

T_{l1}, T_{l2} – минимально и максимально допустимая рабочая температура для l -го БПЛА.

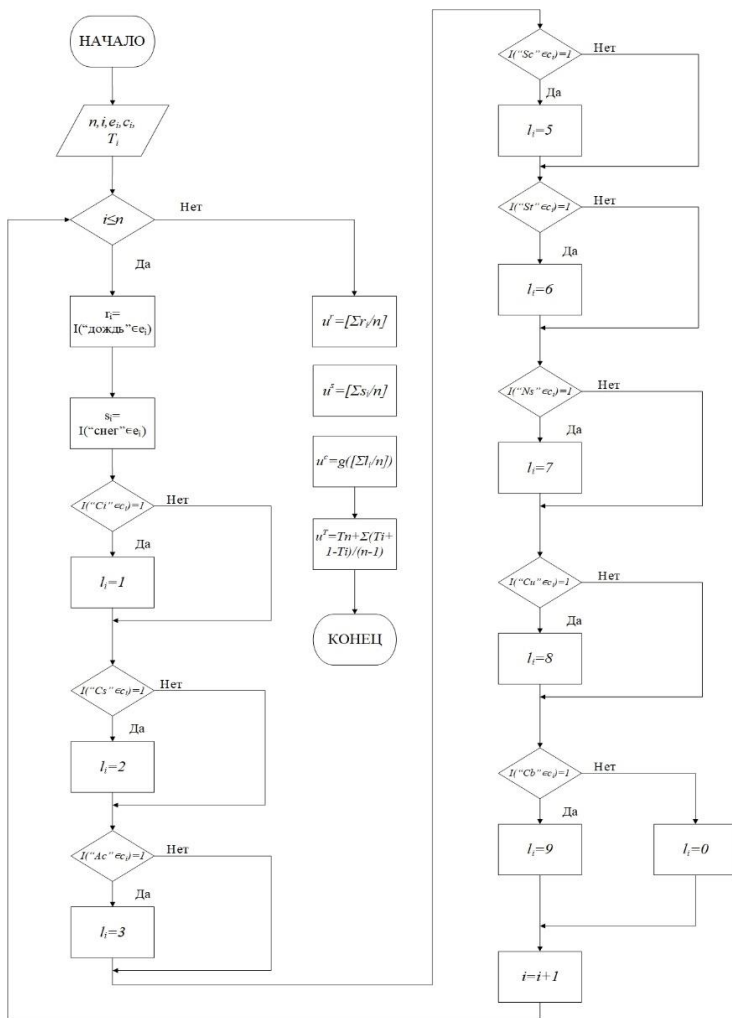


Рис. 3 - Алгоритм определения прогнозных метеорологических индикаторов

В четвертой главе проведена оценка результатов разработанного метода, алгоритмического и информационного обеспечения посредством проведения вычислительных экспериментов. Экспериментально подтверждено повышение показателя стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА при неблагоприятных условиях функционирования для рассчитанного рационального сценария транспортировки грузов до 22.1 % для разработанного алгоритмического обеспечения по сравнению с полученной в результате применения стандартного алгоритмического обеспечения. На рис. 4а-4г и

в табл. 1 представлена часть результатов экспериментов для оценки результатов разработанного алгоритмического обеспечения для одного из рассматриваемых районов. В табл. 1 $u_y^r, u_y^s, u_y^c, u_y^T$ соответствуют метеорологическим индикаторам дождя, снега, облачности и температуры на шаге y , а E_{1y}^* и E_{2y}^* - показателям стоимостной оценки отсутствия простоев БПЛА на шаге y , полученными с использованием существующего и разработанного алгоритмического обеспечения.

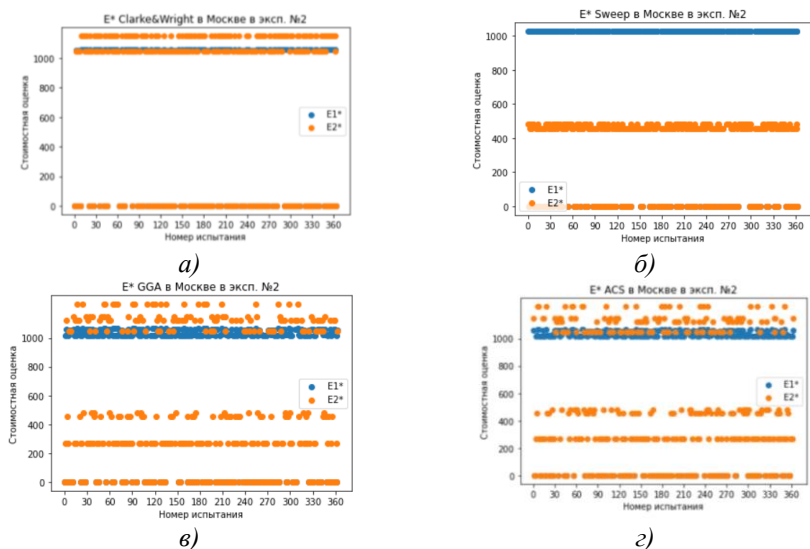


Рис. 4 - Результаты экспериментов

Таблица 1 – Результаты части экспериментов для сравнения разработанного и существующего алгоритмического обеспечения

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

Также проведен ряд экспериментов, подтверждающий, что при неблагоприятных условиях функционирования разработанное информационное обеспечение повышает эффективность, выраженную степень достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА. Экспериментально подтверждена работоспособность и эффективность разработанного метода обработки метеорологической информации, связанная с его оперативностью. Весь ход экспериментов и результаты их проведения представлены в тексте диссертации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

Основные выводы по результатам исследования

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 информационной системы 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 информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации.

2) Разработано информационное обеспечение автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Экспериментально подтверждено, что оно улучшает поддержку принятия решений на стратегическом уровне управления в части повышения эффективности при неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной подсистемы, выраженной степенью достоверности информации о рассчитанном рациональном сценарии транспортировки грузов и соответствующем ему показателе стоимостной оценки отсутствия простоев всех БПЛА.

3) Разработан метод обработки метеорологической информации для автоматизированной метеорологической измерительной системы, включающий оперативную прогностическую обработку информации при неблагоприятных условиях функционирования автоматизированной метеорологической измерительной системы. Экспериментально подтверждена работоспособность метода и его оперативность.

4) Разработано алгоритмическое обеспечение автоматизированной

информационной системы поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации. Экспериментально подтверждено, что оно улучшает поддержку принятия решений 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.

Список опубликованных работ по теме диссертации

в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки РФ:

1. 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. (K2)
2. 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. (K1)
3. 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. (K2)

в изданиях, входящих в базы данных Scopus и WoS:

4. Shirokov A.S., Salomatina A.A., Galin R.R., Zorin V.A. Modelling of Joint Motion Planning of Group of Mobile Robots and Unmanned Aerial Vehicle // Frontiers in Robotics and Electromechanics. – Singapore: Springer, 2023. – P. 163-177.
5. Meshcheryakov R.V., Salomatina 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.
6. Salomatina 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.

в других рецензируемых изданиях:

7. 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.
8. **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.
 9. **Саломатин А.А.** Анализ характеристик аппаратного обеспечения для задач информационной безопасности // Материалы 30-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС'2022, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 207-211.
 10. **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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.

Свидетельства о государственной регистрации ЭВМ:

14. **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
15. **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.

Саломатин Александр Александрович

Автоматизированная информационная система поддержки принятия
решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с
учетом метеорологической информации

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех.
наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100

экз. Типография _____