

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Максимова Софья Евгеньевна

Разработка методики геоинформационного моделирования  
воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов  
беспилотных воздушных судов гражданской авиации

1.6.20. Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
Духин Степан Владимирович

Москва – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ РИСКОВОЙ БВС-АКТИВНОСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	14
1.1 Анализ воздушного пространства Российской Федерации в аспектах управления рисковой БВС-активностью.....	14
1.2 Анализ предметной области геоинформационного моделирования пространственных объектов и систем.....	18
1.3 Опыт решения научных задач, связанных с моделированием значимых аспектов воздушного пространства.....	21
1.4 Подходы к геоинформационному моделированию воздушного пространства .....	23
1.5 Существующие геоинформационные модели воздушного пространства Российской Федерации для пользователей, применяющих беспилотные воздушные суда.....	28
1.6 Проблемные вопросы геоинформационного моделирования воздушного пространства и постановка задач исследования .....	34
Выводы по первой главе .....	37
2 РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА БВС-АКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАНТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ.....	39
2.1 Концептуальная модель ограничений для полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве.....	40
2.2 Геоинформационное моделирование ограничений, обусловленных структурой воздушного пространства.....	47
2.3. Геоинформационное моделирование ограничений, обусловленных классификацией воздушного пространства.....	54

2.4 Геоинформационное моделирование ограничений в воздушном пространстве по метеорологическим условиям.....	63
2.5 Геоинформационное моделирование наземных материальных пространственных объектов, ограничивающих перемещение беспилотных воздушных судов .....	68
2.6 Геоинформационное моделирование допустимой зоны перемещения беспилотного воздушного судна .....	72
Выводы по второй главе.....	63
<b>3 ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА .....</b>	<b>75</b>
3.1 Оценка и управление рисками в гражданской авиации.....	77
3.2 Геоинформационный подход к оценке рисков выполнения полета беспилотного воздушного судна.....	84
Выводы по третьей главе .....	90
<b>4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РИСКОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ БВС-ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....</b>	<b>93</b>
4.1 Разработка и обоснование геоинформационной модели сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных .....	94
4.2 Построение модели сегмента воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов гражданской авиации в среде полнофункциональной геоинформационной системы.....	115
4.3 Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного пространства или его сегмента для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации .....	134
Выводы по четвертой главе.....	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>141</b>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А Горизонтальные отрезки риск-ориентированной модели сегмента воздушного пространства над территорией железнодорожной станции Кинель и прилегающей местностью.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Исходные коды программ на языке программирования Python для геоинформационного моделирования воздушного пространства и вычисления оптимального маршрута беспилотного воздушного судна в среде QGIS.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ .....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты о внедрении результатов диссертационного исследования .....	180

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Геоинформационное моделирование движения материальных тел в пространстве используется для решения практических задач, в том числе для вычисления оптимальных маршрутов передвижения. В современных условиях наблюдается развитие беспилотного транспорта, в том числе беспилотных авиационных систем (далее – БАС). Данные транспортные средства рассматриваются представителями авиакосмической промышленности как значимые компоненты будущей системы транспорта.

Развитие транспортных беспилотных технологий для различных сфер применения включено в перечень важнейших наукоемких технологий Российской Федерации, утвержденный Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. №529. Распоряжением Правительства от 21 июня 2023 г. № 1630-р утверждена стратегия развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. и план мероприятий по ее реализации. Развитие инфраструктуры для эксплуатации БАС является частью национального проекта «Беспилотные авиационные системы».

На сегодняшний день не решена актуальная задача по созданию инструментов вычисления оптимальных маршрутов в воздушном пространстве для полетов беспилотных воздушных судов (далее – БВС) гражданской авиации из точки старта в точку назначения. В мировой и отечественной науке имеется опыт создания алгоритмов построения оптимальных маршрутов перемещения материальных тел в трехмерном пространстве, однако при решении задач в области построения маршрутов и управления транспортом непосредственное применение многих математических моделей становится невозможным по причине отсутствия необходимых пространственных географических данных.

Наряду с геопространственной информацией о воздушном пространстве или его сегменте, эксплуатанты БВС нуждаются в специальных методах

представления, обработки и преобразования геопространственных данных, пространственно-временного анализа обстановки в геопространстве, выработки рекомендаций по оптимизации своей деятельности для решения задач перемещения БВС из точки старта в точку назначения, оценки динамической георисковой обстановки в сегменте воздушного пространства, выработки рекомендаций по снижению рисков возникновения авиационных инцидентов и происшествий. Современные полнофункциональные ГИС предлагают пользователю широкий спектр средств обработки и анализа информации о пространственных объектах и явлениях, ориентированный на решение пользователями геопространственных задач в различных предметных областях. Выявлено общее противоречие между геоконтроллинговыми потребностями транспортной системы эксплуатанта БВС в сегменте воздушного пространства и отсутствием адекватного модельно-методического аппарата пространственно-временного представления, анализа и автоматизированного управления. Кроме того, выявлены частные противоречия – между потребностью и отсутствием:

- геоинформационной модели операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства;
- методики оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций.

Соответственно, актуальность работы состоит в необходимости преодоления указанных противоречий путем разработки специального модельно-методического аппарата геопространственного представления, анализа и регулирования транспортной системы эксплуатанта БВС в части, касающейся полетов из точки старта в точку назначения.

**Объект исследования** – пространство рисковой БВС-активности.

**Предмет исследования** – модели и методы представления, анализа и регулирования гражданской рисковой БВС-активности.

**Целью исследования** является разработка модельно-методического аппарата геоинформационного представления и регулирования рисковой БВС-активности.

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ предметной области рисковой БВС-активности и постановка задач исследования.
2. Разработка геоинформационной модели воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации.
3. Разработка методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций.

#### **Научные результаты, выносимые на защиту.**

1. Геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации.
2. Методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций.

#### **Новизна научных результатов:**

1. Геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской отличается:
  - раздельным представлением стационарной и динамической составляющих пространства БВС-активности,
  - полнофункциональным учетом составляющих элементов рисковой БВС-активности, включающих структуры окружающей геосреды, норм регулирования БВС-активности, систем БВС-платформ, инфраструктурных подсистем обеспечения БВС-активности (навигация, связь, освещение обстановки),
  - пространственно-содержательным описанием специального геообъекта «беспилотное воздушное судно»,

- расширением множества упорядочивающих отношений пространства БВС-активности в части, касающейся формализации предметной области БВС-активности,
- оригинальным комбинированием геоинформационных моделей пространственно-временных ограничений для пилотирования БВС,
- селектированием актуальных ограничений для конкретного полетного задания БВС,
- представлением объектов и отношений в системе БВС-деятельности на единой геопространственной основе.

что обеспечивает и дает возможность:

- территориальную интерпретацию и геоизображение необходимых (функциональное подпространство) и достаточных (операционное подпространство) детерминант пространства БВС-активности,
- оперативно строить, отображать и корректировать пространственную зону возможной деятельности БВС в условиях действующих нормативно-правовых установок и возможностей систем обеспечения БВС-деятельности в регионе,
- оперативно строить, отображать и корректировать область возможного применения БВС в условиях изменения технического состояния геообъекта «БВС» и состояния окружающей геосреды (ветер, осадки, давление, температура, влажность, видимость, рельеф местности), и решаемых специальных задач,
- учитывать восприятие обстановки в операционном и функциональном пространстве БВС-активности с позиции конкретного эксплуатанта БВС,
- учитывать разнородную пространственно-временную информацию о геоситуации на основе дискретизации трехмерного пространства и оси времени;
- обеспечивать оптимизацию эксплуатации парка беспилотных авиационных транспортных средств эксплуатанта.

2. Методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций отличается

- возможностью оперативного наполнения геомоделей геопространственной информацией от различных источников априорной и оперативной геопространственной информации об обстановке в регионе (ДЗЗ, геосенсоры, базы данных, системы наблюдения),
  - оперативным решением классических этапов управления объектами и системами БВС-активности на единой геопространственной основе,
  - использованием категории «обстановка» в качестве контроллинговой основы процесса регулирования БВС-деятельности,
  - оперативной пространственно-содержательной локализацией зоны возможных решений БВС-деятельности в условиях быстро меняющейся погодной, технико-технологической и контроллинговой обстановки,
  - интеграцией пространственного анализа и планирования с системой ситуационных, технико-технологических, эксплуатационных показателей эффективности функционирования БВС – элементов транспортной системы эксплуатанта, учитывающей его интересы,
  - адаптацией алгоритмов вычисления оптимальных маршрутов перемещения в трехмерном пространстве к географически конкретной обстановке,
- что обеспечивает,
- непрерывную сквозную многоуровневую обработку разнородной геопространственной информации об обстановке в районе полетов БВС,
  - оперативную выработку вариантов содержательно-пространственных рекомендаций по оптимизации БВС-деятельности в условиях быстроменяющейся геоситуации, и контроллинговых установок,
  - геоинформационную поддержку деятельности эксплуатанта в части, касающейся оперативного планирования полетов БВС,
  - снижение издержек эксплуатанта БВС от выполнения полетов в условиях, не являющихся наиболее приемлемыми.

**Теоретическая значимость** работы в области научных и методических основ геоинформатики складывается из дополнения процедур планирования

использования воздушного пространства эксплуатантом БВС геоконтроллинговой поддержкой путем разработки модельно-методического аппарата геоинформационного представления и регулирования рисковой БВС-активности; из целевого комбинирования и адаптации известных принципов, моделей и методов представления и анализа геопространственной ситуации для моделирования обстановки в сегменте воздушного пространства системообразующими зависимостями универсальных параметров состояний и процессов в дискретных пространственно-временных ячейках модели; из структурирования геоинформационной модели воздушного пространства подмоделями обстановки, а именно моделями различных категорий ограничений для перемещения БВС и моделями геопространственных мероприятий; из корреляции оперативности геомодели рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства со структурой и функциональностью двух уровней ее регулирования.

**Практическая ценность** работы определяется способностью модельно-методического аппарата организации регулирования перемещения БВС в пространстве рисковой БВС-активности, модель которого построена над территорией существующего географического объекта и используется для вычисления оптимальных маршрутов перемещения БВС из точки старта в точку назначения. Разработанная методика геоинформационного моделирования воздушного пространства внедрена в деятельность юридических лиц – эксплуатантов БВС гражданской авиации и разработчиков программного обеспечения автономных станций с беспилотными воздушными судами. Таким образом, созданная модель эффективного применения знаний в области геоинформационного моделирования позволяет достичь решения задачи по вычислению оптимального маршрута перемещения БВС в воздушном пространстве из точки старта в точку назначения, актуальной для эксплуатантов БВС гражданской авиации за счет геоинформационного моделирования

в функциональном пространстве объектов, явлений, связей и отношений, значимых для планирования полета конкретным эксплуатантом.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов и выводов обусловлена применением хорошо апробированных методов анализа и синтеза, всесторонним учетом факторов, влияющих на результаты исследования, доведением теоретических выкладок до конечных машинных алгоритмов и программ, совпадением полученных результатов с представлениями ведущих экспертов. Достоверность подтверждается внедрением, апробацией и публикацией результатов исследования.

**Методология и методы исследования.** В ходе настоящего исследования используются методы анализа научной литературы, существующих геоинформационных моделей воздушного пространства, а также нормативно-правовых документов РФ в части, касающейся воздушного пространства, практики применения беспилотных авиационных систем для решения частных задач. Исследование базируется на системном подходе и системном анализе, в частности, воздушное пространство рассматривается как система, локализованная в определенных границах. Для систематизации знаний о воздушном пространстве и его аспектах, значимых для вычисления оптимального маршрута полета БВС, применен онтологический подход. В работе использованы методы геоинформационного моделирования пространственных объектов и их отношений в среде полнофункциональной геоинформационной системы.

**Теоретической базой исследования** послужили труды ведущих ученых – Алтынцева М.А., Байкова Е.А., Биденко С.И., Булгакова С.В., Бунге В., Бурлова В.Г., Дмитриева В.В., Елисеева Б.П., Истомина Е.П., Конкина А.В., Малинин В.Н., Присяжнюка С.П., Пьянкова С.В., Розенберга И.Н., Рябца А.Я., Соколова А.Г., Цветкова В.Я., Шарова В.Д., Шихова А.Н., Яшина А.И., Не Н., Primatesta S., Susini A.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография» по пунктам 2, 7, 11.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования докладывались на 8 научно-практических конференциях:

- Международная научно-практическая конференция молодых ученых "ИНФОГЕО 2025: Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции" (Санкт-Петербург, 2025);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития информационных систем и технологий в современном обществе» (Орел, 2024);
- XII Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 2024);
- II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ГЕОФОРУМ» (Нижний Новгород, 2024);
- VII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (Москва, 2024);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Образцовый маршрут» (Москва, 2024);
- V Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры» (Санкт-Петербург, 2024);
- Всероссийская научно-практическая студенческая конференция «Неделя науки – 2023» (Москва, 2023).

Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность двух эксплуатантов БВС гражданской авиации и одного производителя программного обеспечения для автономных дронопортов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 12 работ, из них: 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, остальные – в других

научных изданиях. Получено два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. В работе содержится 6 таблиц, 45 рисунков, 39 формул. Список литературы включает 143 наименования, в том числе ресурсы в сети Интернет. Общий объём диссертации – 158 страниц.

## **1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ РИСКОВОЙ БВС-АКТИВНОСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Анализ воздушного пространства Российской Федерации в аспектах управления рисковой БВС-активностью**

Часть земной атмосферы, пригодной для выполнения перемещения различных типов воздушных судов, следует считать воздушным пространством. Пространство состоит из множества систем (подсистем), каждая из которых содержится в более масштабной системе [33]. В свою очередь, воздушное пространство является частью более масштабной пространственной системы. Пространство внутренне структурировано [33]. Мир есть система систем. Понятие «система» является одним из базовых в геоинформатике транспорта.

Для системы характерно наличие четких границ [70]. В действующих международных нормативных актах [17, 116] не определена четкая граница (отметка высоты) между безвоздушным и воздушным пространством или вертикальная протяженность воздушного пространства [125]. При этом для описания условной границы между воздушным и космическим пространством условно принимают линию Кармана, которую Международная авиационная федерация определяет на высоте 100 км над уровнем моря. Нижней границей воздушного пространства следует считать поверхность земли. Боковые границы какой-либо части воздушного пространства представляют собой вертикальную плоскость вдоль линии границы, расположенной на поверхности земли.

По правовому положению различают суверенное воздушное пространство какого-либо государства и открытое воздушное пространство. Кроме того, государство по международным соглашениям может взять на себя контроль за использованием какой-либо части международного воздушного пространства.

Государство устанавливает нормы, принципы и правила использования суверенного воздушного пространства, что отражается в соответствующих положениях нормативно-правовых документов. В Российской Федерации нормативно-правовым документом, устанавливающим основы использования воздушного пространства и деятельности в области авиации, является Воздушный кодекс. На основе данного нормативно-правового акта, его статей и пунктов написаны и введены в действие другие документы, регламентирующие различные аспекты деятельности в области использования воздушного пространства, выполнения полетов различных типов воздушных судов и многое другое. Совокупность данных документов называется воздушным законодательством Российской Федерации.

Выполнение полетов воздушных судов различных категорий подразумевает наличие риска: воздушное судно подвергается воздействию факторов опасности, при этом являясь источником опасности для воздушных, наземных и надводных объектов. Поэтому деятельность эксплуатантов воздушных судов регламентируется нормативно-правовыми актами, соответственно, регулируется рисковая активность [68] в воздушном пространстве. Использование воздушного пространства в различных целях, в том числе для полетов воздушных судов и других видов деятельности, должно выполняться в соответствии с требованиями международных договоров, нормативно-правовых актов государств и нормативных актов регионального уровня (если предусмотрено). Неосведомленный пользователь, исходя из возможности перемещения БВС практически в любых направлениях, а не строго по фиксированной транспортной сети, может субъективно представлять воздушное пространство как монолитную структуру, однако данное представление ошибочно. Воздушное пространство Российской Федерации представляет собой единую структуру из различных элементов, типы которых перечислены в воздушном законодательстве РФ, а их границы (с указанием пар координат и высотными отметками) устанавливаются приказами Министерства

транспорта РФ. Кроме того, воздушное пространство Российской Федерации разделено на классы. Планирование и координирование движения в воздушном пространстве Российской Федерации осуществляют органы Единой Системы Организации воздушного движения (далее – ЕС ОрВД) [73], руководствуясь нормативно-правовыми документами соответствующего иерархического уровня.

В основу планирования воздушного движения положен ряд общесистемных принципов, основными из которых являются принципы декомпозиции и формирования частных целей и задач [96]. На этапе планирования использования воздушного пространства органы ЕС ОРВД осуществляют сбор и обработку информации о предполагаемой деятельности в воздушном пространстве и воздушном движении, в том числе полученных планов полета и представлений на установление местных и временных режимов использования воздушного пространства.

Пользователи воздушного пространства направляют планы полетов воздушных судов в соответствующие органы ЕС ОрВД. Движение воздушных судов выполняется не только по установленным маршрутам обслуживания воздушного движения, но и вне их. Полеты БВС, у которых не предусмотрено оборудование, обеспечивающее двухстороннюю радиосвязь с органом обслуживания воздушного движения, выполняются в сегрегированном воздушном пространстве: использование воздушного пространства такими БВС осуществляется посредством установления временного, местного режимов, а также кратковременных ограничений [59, 78], которые устанавливают с целью запрещения или ограничения использования воздушного пространства.

В соответствии с [117] обеспечение качественного и эффективного обслуживания полетов с соблюдением требуемого уровня безопасности является основной целью систем организации и управления воздушным движением. Органы ЕС ОрВД не оказывают пользователям воздушного пространства услуги в части, касающейся вычисления оптимальных маршрутов для перемещения воздушных

судов, построение маршрута полета – это задача пользователей воздушного пространства. Если предполагается пилотирование БВС без установления местного или временного режимов, пользователю необходимо изучить актуальную информацию о воздушном пространстве в месте полета с целью удостовериться, что полет соответствует критериям, установленным воздушным законодательством.

В случае возникновения потребности в использовании воздушного пространства одновременно двумя и более пользователями воздушного пространства, соответствующий орган ЕС ОрВД руководствуется документом, который поступил раньше. Если документы поступили одновременно, право на использование воздушного пространства предоставляется пользователям в соответствии с государственными приоритетами, изложенными в [74].

В соответствии с эксплуатационными потребностями выделяют две группы составителей планов полетов воздушных судов [96]. Крупным эксплуатантам необходим доступ к наиболее точной и актуальной информации по операционной среде, обычно они имеют доступ к сложной инфраструктуре планирования полетов. Некрупные эксплуатанты, к числу которых относятся физические лица, используют современную дешевую инфраструктуру средств связи для быстрого получения доступной информации о воздушном пространстве. Эксплуатанты БВС гражданской авиации регулируют деятельность своей авиационно-транспортной системы в воздушном пространстве, в котором присутствуют различные факторы опасности. Таким образом, эксплуатанты регулируют рисковую БВС-активность своей авиационно-транспортной системы.

Как правило, юридические лица, применяющие и эксплуатирующие беспилотные воздушные суда, а также физические лица не являются крупными эксплуатантами воздушных судов. Для изучения информации о структуре и классификации воздушного пространства РФ, подготовки представлений на установление местных и временных режимов, планов полетов работниками

используются в том числе геосервисы в сети Интернет, предоставляющие указанную информацию широкому кругу пользователей.

## **1.2. Анализ предметной области геоинформационного моделирования пространственных объектов и систем**

Моделирование является одним из основных методов исследования в естественных и технических науках. Метод моделирования подразумевает замену реального объекта моделью, которая сохраняет значимые для поставленной цели исследования параметры оригинала, и ее дальнейшее изучение. Данный метод получил широкое распространение в науке и технике XX в. по причине резкого усложнения объектов исследования [46]. Проектирование и создание моделей объектов, явлений и процессов требует организации и систематизации знаний о соответствующей предметной области. Моделирование является инструментом познавательной деятельности и служит основой современной науки [113]. В некоторых случаях моделирование рассматривают как способ испытания, подтверждения определенного предположения. Междисциплинарное значение моделирования состоит в возможности переноса знаний [87]. Создание моделей сложных объектов и систем актуально в контексте цифровизации различных сфер деятельности современного общества. Моделирование является основой комплексного информационного обеспечения [104].

Задачи, связанные с моделированием, часто решаются в компьютерных моделирующих средах [114]. Применение моделей в прикладных исследованиях позволяет с меньшими затратами воссоздать процессы взаимодействия реального объекта и внешней среды и выявить критерии оптимизации этого взаимодействия. В зависимости от множества факторов, в том числе направления исследования, в ходе моделирования выполняется интерпретация определенных свойств

и особенностей объекта исследования, учет которых необходим в ходе решения поставленной задачи. Процесс моделирования можно рассматривать как исследовательскую деятельность, опосредованную информационными моделями [113]. Моделирование имеет фундаментальное значение в управлении транспортными системами. Метод моделирования актуален для изучения динамических систем [87], в том числе воздушного пространства и его тематических аспектов. Применение методов моделирования для решения задач, связанных с различными тематическими аспектами воздушного пространства или его сегмента, целесообразно по причине сложности, многомерности и многосвязности системы организации и управления воздушным движением, а также невозможности проведения объемных натурных или хотя бы полунатурных исследований в данной области [15].

Одним из видов пространственного моделирования является геоинформационное моделирование. Данный вид моделирования предполагает построение, преобразование и практическое использование геоинформационных моделей объектов исследования. В геоинформационном моделировании присутствуют теоретический, информационный, технологический, ситуационный аспекты [70]. Целью геоинформационного моделирования является построение геоинформационной модели объекта исследования для решения актуальной задачи. В геоинформационном моделировании учитываются данные об объекте моделирования и его семантическом окружении [9, 104], о взаимодействии объекта с внешней средой. В некоторых случаях объект геоинформационного моделирования представляет собой сложную систему, локализованную в определенных границах в заданном интервале времени. Сложной системой называют совокупность множества частей, элементов, связей и отношений, имеющих структуры и образующих целостность и единство [24, 37]. Системный подход предполагает рассмотрение объектов, процессов и явлений как сложных систем при определенных условиях [108]. Локализация в геоинформационном

пространстве определяется координатами. При исследовании пространственных аспектов реального мира во многих случаях предпочтительно использовать геоинформационную модель объекта или явления – модель, построенную методами и средствами геоинформатики, отображающую объект моделирования, наиболее важные пространственные отношения [9]. В научной литературе [9] содержится описание следующих свойств геоинформационной модели: адекватность, целенаправленность, обобщенность, адаптивность, параметричность, идентифицируемость, устойчивость, управляемость, отражение отношений, наглядность, полнота, моделепригодность, эволюционируемость. Построение геоинформационной модели объекта включает подготовку графической и табличной составляющих [6]. В свою очередь, геоинформационная модель объекта может являться частью более общей модели. Геоинформационные модели образуют особый класс информационных моделей, предназначенных для отображения естественных и искусственных систем реального мира. Геоинформационные модели и системы обладают всеми необходимыми свойствами для того, чтобы выступать в качестве объектов и субъектов информационных отношений [87]. Инструментом исполнения геоинформационной модели является геоинформационная система (полнофункциональная и специализированная) или геоинформационный сервис (геосервис). Основой построения моделей в геоинформатике является образная презентация, в рамках которой используются методы хранения информации в виде пространственных образов как совокупности пространственно-временной информации [52].

Преобразования, основанные на теоретико-множественных отношениях, законах формальной логики, технологиях систем управления базами данных (далее – СУБД), алгоритмах обработки изображений, технологиях работы с компьютерной графикой и многом другом, составляют теоретическую основу геоинформационного моделирования. В геоинформационном моделировании используются геореференции и пространственные отношения [41, 51].

В ходе геоинформационного моделирования с выделенным объектом или объектами действует предположение, что остальные объекты в это время не изменяются и являются пассивными.

Результаты исследования геоинформационных моделей объекта могут быть перенесены на оригинал. Исследования пространственных отношений являются ключевыми в геоинформатике [109], а интеграция пространственных, временных и тематических геоданных в единую систему дает синергетический эффект [11].

### **1.3. Опыт решения научных задач, связанных с моделированием значимых аспектов воздушного пространства**

Необходимость разработки новых решений в области использования воздушного пространства обусловлена увеличением сложности данной системы в связи с интенсификацией воздушного движения и присутствием нового типа транспортных средств – беспилотных воздушных судов. В деятельности как российских, так и зарубежных ученых накоплен опыт решения пространственных задач в части, касающейся расширения возможностей применения беспилотных воздушных судов в рамках действующих систем управления воздушным движением государств. Зарубежные государства и их объединения разрабатывают и реализуют такие комплексные программы, как UOMS [135], K-UTM [129], U-Space [120, 121], Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft System (UTM-UAS) [135], NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management [128], UTM-core [135]. Данные программы реализуются в Китайской народной республике, Республике Корея, Европейском Союзе, Сингапуре, США, Японии. Обязательной частью указанных программ является выработка решений по планированию и оптимальному использованию воздушного пространства для пилотирования БВС.

Моделирование различных аспектов, значимых для планирования полета БВС, затронуто в научных публикациях. В работах [142, 143] авторы предлагают вычислять в ячейках пространства вероятность неблагоприятных погодных условий и учитывать результаты при планировании полета. Расчеты выполняются в ГИС-среде. Авторы научной работы [137] предлагают вычислять оптимальные маршруты полета БВС в городской среде из точки старта в точку назначения с учетом различных видов препятствий и оценки рисков возможного ущерба третьим лицам. Авторами работы [49], в которой рассмотрен процесс построения траектории полета БВС вне запретных зон, выделены наиболее простые формы визуализации их границ (круглая, прямоугольная и многогранная формы). В работе [45] предложено моделировать полигоны, в границах которых выполнение полета БВС невозможно по причине неблагоприятных метеорологических условий. Авторы работы [134] предложили подход к вычислению оптимального с позиции энергозатрат маршрута полета БВС в типичном микрорайоне континентальной Европы с учетом климатических условий. В статьях [126, 133] описан опыт применения геоинформационных систем для количественной оценки последствий падения БВС для третьих лиц с вычислением значений индексов риска в двумерных ячейках цифровой модели территории. Исследования, представленные в работах [124, 131], описывают возможности применения дискретных моделей трехмерного пространства для решения задач в областях, связанных с моделированием воздушного пространства для полетов БВС. В статье [139] предложено оценивать риск в трехмерных ячейках модели воздушного пространства.

Таким образом, на уровне государств и их объединений разрабатываются и реализуются комплексные программы по расширению возможностей применения беспилотных воздушных судов. В свою очередь, во многих опубликованных научных работах рассмотрены процессы моделирования различных аспектов, значимых для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС.

## **1.4. Подходы к геоинформационному моделированию воздушного пространства**

По аналогии с термином геоинформационная модель территории и его определением в [9], следует толковать термин «геоинформационная модель воздушного пространства» согласно изложенному. Геоинформационная модель воздушного пространства – цифровая или аналоговая модель воздушного пространства или его сегмента, поддерживаемая любой геоинформационной системой, отображающая геометрическое расположение точек элементов структуры воздушного пространства, а также объектов, находящиеся в воздушном пространстве, их параметров, атрибутов и пространственных отношений.

Сложность моделирования современного воздушного пространства обусловлена такими факторами, как трехмерность и динамичность системы, международные границы, наличие классов и элементов структуры, наличие различных видов авиации, а также особенностей перемещения различных типов транспортных средств и выполнения других видов деятельности. Кроме того, воздушное пространство как система сложно для восприятия неподготовленным пользователем. Развитие системы воздушного пространства по причине интеграции беспилотных воздушных судов и возможный рост интенсивности воздушного движения, а также изменения нормативно-правовых документов в данной области, затрудняют понимание, анализ и моделирование данной системы. Таким образом, у пользователей воздушного пространства, планирующих и осуществляющих применение и эксплуатацию БАС, создается информационный барьер.

Разработка новых моделей воздушного пространства и методов моделирования необходима для решения научных и практических задач. В связи со сложностью воздушного пространства для построения его геоинформационной модели необходимо дискретизировать данную систему на составляющие

и предложить соответствующие геоинформационные единицы для понимания и упрощения процессов моделирования и действий с моделью. Геоинформационное моделирование является инструментом преодоления информационного барьера [106].

В связи с особенностями географического положения государств, локализацией рассматриваемых систем в определенных границах и различиями в нормативно-правовых актах государств уместно в названии модели указывать название страны. Кроме того, при решении определенных задач достаточно выполнить моделирование не всего воздушного пространства государства, а только некоторой его части, которую следует называть сегментом. Установление пространственной, временной и семантической границы геоинформационной модели воздушного пространства сокращает избыточность рабочей области анализа [92].

В моделировании пространства как системы целесообразно использовать устойчивые объекты, отношения и взаимосвязи. Кроме того, для моделирования важны закономерности изменения характеристик объектов, если таковые возможно выявить и описать. В целях адекватного представления географического пространства необходимо использовать компьютерные технологии для описания атрибутов пользовательских концепций, их геометрических и позиционных компонентов [19, 89]. В настоящей работе предлагается рассматривать воздушное пространство с позиции системного подхода, а именно как комплекс целенаправленно взаимосвязанных элементов и отношений между ними [33].

Геоинформационная модель воздушного пространства государства или его сегмента является сложной составной моделью, то есть содержит в себе более мелкие модели – модели элементов структуры воздушного пространства, границы которых не материализованы, а также модели других объектов и явлений в воздушном пространстве. В качестве источника информации о воздушном пространстве могут быть использованы нормативно-правовые документы

федерального уровня, а также регионального уровня. Информация о классах и элементах структуры воздушного пространства содержится в соответствующих приказах Министерства транспорта Российской Федерации [56]. Кроме того, ценным источником информации для моделирования являются сборники аeronавигационной информации, опубликованные в сети Интернет. Источниками информации для модели воздушного пространства или его сегмента могут быть данные, опубликованные на ресурсах в сети Интернет [34, 69, 97, 119], описанных в подглаве 1.5 настоящей работы.

В геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента, предназначеннной для решения тематической задачи, необходимые данные должны быть организованы в единую логически непротиворечивую модель. При решении тематических задач, связанных с моделированием воздушного пространства, актуально использование геоинформационных моделей, отражающих физико-географические факторы, а именно: модель рельефа местности, модели фактической и прогнозируемой погоды, растительности, орнитологической обстановки, водных объектов, ледовой обстановки и другие. Модели материальных объектов антропогенного происхождения (здания и сооружения) могут стать частью модели воздушного пространства. Кроме того, в зависимости от контекста может быть внесена дополнительная пространственно-временная и атрибутивная информация о каких-либо объектах или явлениях, в том числе для моделирования ситуационной составляющей. Систематизация знаний об объектах геоинформационного моделирования и их сущности требует обобщенного описания, для получения которого актуально применение онтологического подхода [91].

Для решения задач между объектом и его геоинформационной моделью должно быть установлено однозначное соответствие по наиболее значимым параметрам [3]. В геоинформационной модели воздушного пространства

или его сегмента целесообразно воспроизводить те категории объектов, отношений и связей, которые утвердились в повседневной практике решения задач.

Геоинформационная модель воздушного пространства или его сегмента выполняется в интересах заданного круга пользователей, решаяющих определенные тематические задачи, поэтому данная модель может строиться по-разному в зависимости от поставленной прикладной или научной задачи. Модель отражает только основные свойства объекта, учет которых необходим для решения поставленной задачи, поэтому невозможна ситуация, когда модель обладает всесторонней адекватностью [104]. Например, модель воздушного пространства, применяемая для управления воздушным движением страны и функционирования органов ЕС ОрВД, не применима для решения частных задач мелкого эксплуатанта БВС. Кроме того, геоинформационная модель сегмента воздушного пространства для построения маршрута полета пилотируемого воздушного судна, выполняющего перевозки пассажиров, багажа, грузов и почты, будет существенно отличаться от модели, предназначеннной для построения оптимального маршрута перемещения БВС из точки старта в точку назначения [56]. Данная модель должна содержать соответствующий набор пространственных, временных и тематических данных. С учетом того, что многие объекты, находящиеся в воздушном пространстве, не являются статичными, следует рассматривать пространственные и временные данные не по отдельности, а как совокупность пространственно-временных данных. Следует перечислить требования к пространственно-временным данным, используемым для построения модели воздушного пространства или его сегмента, которая будет использоваться для решения какой-либо тематической задачи: доступность, точность, взаимосвязанность, полнота, непротиворечивость, однозначность, релевантность, надежность, своевременность [44]. Таким образом, геоинформационная модель воздушного пространства или его сегмента является динамической, то есть отражает изменение состояния локализованной системы в определенный интервал времени [40]. В интересах пользователя

геоинформационная модель может быть дополнена информацией об ограничениях по форме и площади участков для безопасного взлета и посадки БВС, по возможности поддержки связи между пультом управления и БВС и пр.

Обработка данных в геоинформатике транспорта требует комплексного подхода [47]. Объективным фактором формирования информационных конструкций в различных областях научного знания являются информационные единицы [6]. В науках об информации информационные единицы часто являются базовыми элементами теории [105]. Для теоретического описания и практической реализации тематической геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента следует использовать соответствующие информационные единицы, рассмотренные в главах 2, 3 и 4 настоящей работы. Информационные единицы являются не только инструментом и частью информационных технологий, но и инструментом переноса знаний, что расширяет научную картину мира [138].

Основным фактором модификации в геоинформационной модели воздушного пространства являются изменения ситуации на объектах, модели которых включены в модель воздушного пространства. Изменение геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента обязательно и целесообразно в случаях, когда предполагаемые изменения отражены в соответствующих нормативно-правовых актах или других документах. Для функционирования автоматизированного инструмента построения оптимальных маршрутов БВС необходима своевременная актуализация геоинформационной модели воздушного пространства. При этом в модели, используемой для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС, значима ситуационная составляющая, информация о которой также должна быть своевременно внесена в геоинформационную модель.

## **1.5. Существующие геоинформационные модели воздушного пространства Российской Федерации для пользователей, применяющих беспилотные воздушные суда**

В Российской Федерации доступны ресурсы в сети Интернет, содержащие информацию о воздушном пространстве страны. Данные геосервисы предоставляют пользователям информацию о структуре воздушного пространства в форме, доступной для понимания широким кругом пользователей [59]. Получать информацию о воздушном пространстве с таких геосервисов проще, чем изучать карты на бумажных или электронных носителях или нормативно-правовые акты, содержащие сведения об элементах структуры воздушного пространства в текстово-табличной форме. Создание геосервисов с таким тематическим наполнением стало закономерным следствием распространения беспилотных воздушных судов среди большого количества пользователей, роста применения БВС для решения прикладных и научных задач, динамичного развития веб-картографии и роста сферы ее интересов. В настоящее время доступно четыре таких геосервиса:

- 1) «Карта зон ограничений полетов для БВС – AVTM» [34], далее – «AVTM»;
- 2) «Небосвод UTM» [69], далее – «Небосвод»;
- 3) «Flydrone» [119];
- 4) «Система предоставления планов полетов по сети Интернет» [97], далее – «СППИ».

Геосервисы «AVTM» (Рисунок 1.1), «Небосвод» (Рисунок 1.2) и «Flydrone» (Рисунок 1.3) предназначены для пользователей воздушного пространства, использующих БВС, тогда как «СППИ» (Рисунок 1.4) – для различных типов пользователей воздушного пространства, при этом владельцы и эксплуатанты БВС выделены в отдельную категорию [59].



Рисунок 1.1 – Интерфейс геосервиса «Карта зон ограничений полетов для БСС – АВТМ»

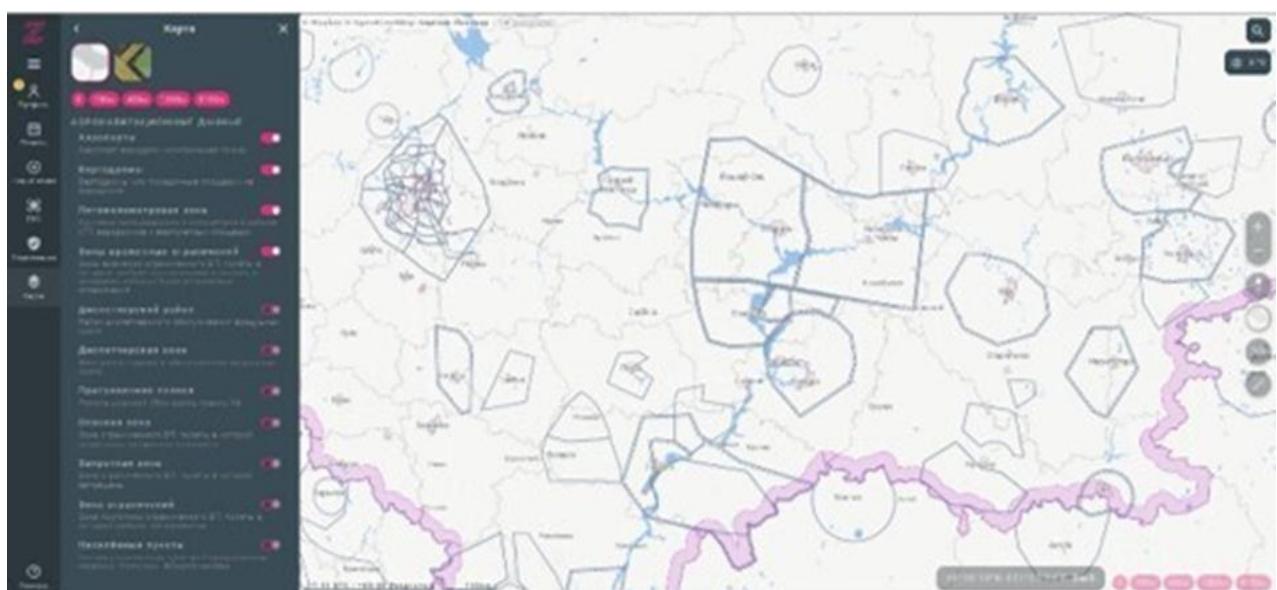


Рисунок 1.2 – Интерфейс геосервиса «Небосвод УТМ»

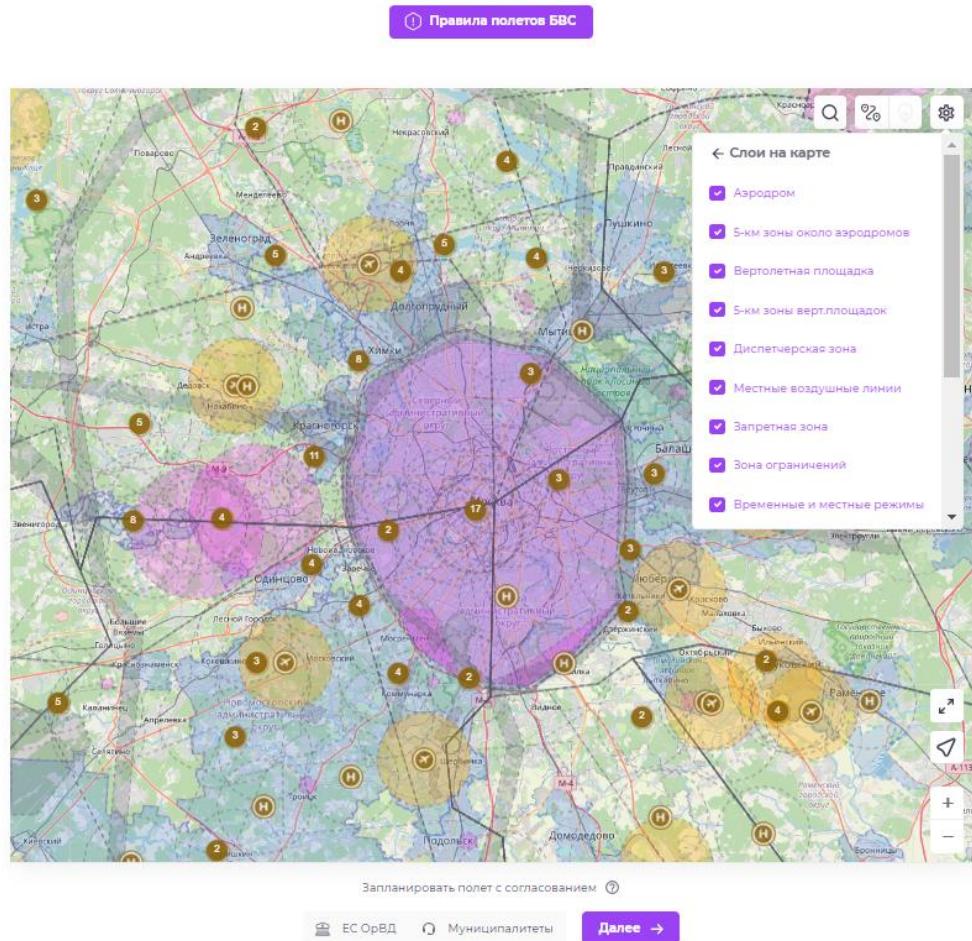


Рисунок 1.3 – Интерфейс геосервиса «Flydrone»

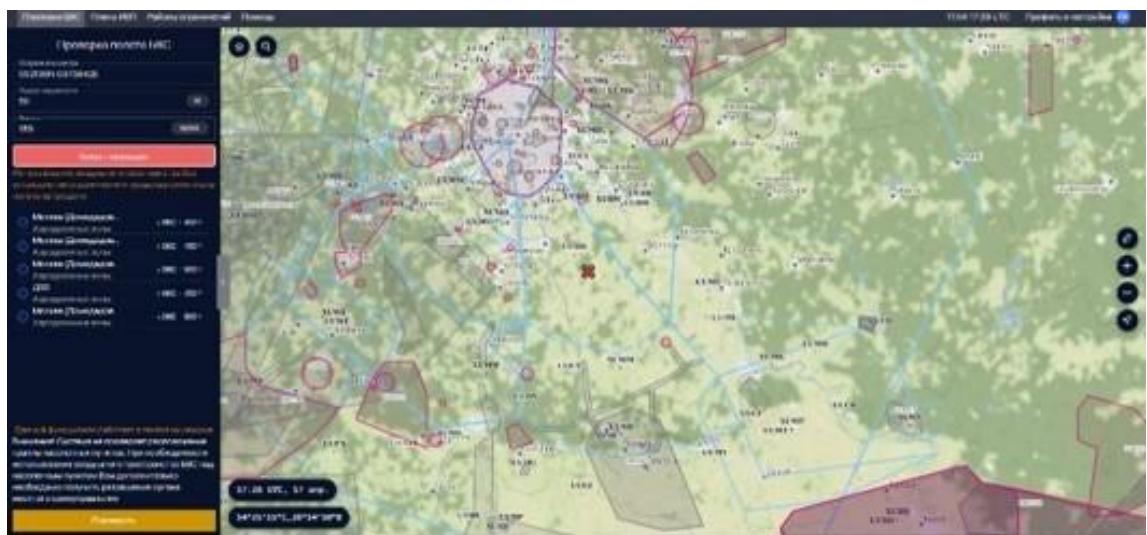


Рисунок 1.4 – Интерфейс геосервиса «Система предоставления планов полетов по сети Интернет»

Обязательными элементами интерфейса являются масштабная линейка, инструмент измерения расстояния, географические координаты, время

на территории планируемого полета (UTC), поисковая строка, окно с отображением карты и дерево слоев. Дерево точечных, линейных и полигональных слоев структурировано в соответствии с видами элементов структуры воздушного пространства. Геосервисы через функцию идентификации предоставляют пользователям возможность просмотра атрибутов элементов структуры воздушного пространства – высоты верхней и нижней границы, расписания функционирования, контактов лиц, с которыми возможно согласовать полет БВС в пределах ограничивающего элемента, а также информации об установленном органами власти регионального уровня запрете полетов БВС. Функция идентификации также позволяет отобразить списком элементы структуры воздушного пространства. Пользователи геосервисов могут воспользоваться функцией проверки возможности пилотирования в светлое время суток БВС с известной максимальной взлетной массой в соответствии с действующими положениями нормативно-правовых актов. Пользователям геосервисов «СППИ» и «AVTM» доступен просмотр прогноза погоды на сутки в месте планируемого полета. На данных геосервисах недоступен просмотр информации о рельефе местности ни в формате растровой или TIN модели, ни в виде топографической карты. Загрузка и добавление слоев, содержащих значимую для конкретного пользователя пространственную информацию, не реализована.

В интерфейсе геосервисов «Небосвод», «Flydrone» и «СППИ» реализовано составление формализованных документов, необходимых для использования воздушного пространства БВС [59]. При этом пользователь задает границы полета БВС на геосервисе, загрузка файла с готовым маршрутом полета возможна только в интерфейсе геосервиса «Flydrone». Далее пользователь вносит информацию о времени полета, типе воздушного судна, бортовом номере и др. Данная возможность доступна только после регистрации пользователя и проверки документов. Предусмотрено внесение информации о разрешениях

на пилотирование БВС в участках воздушного пространства, где полеты ограничены [59].

Геосервисы «СППИ», «Flydrone» и «Небосвод» предоставляют возможность отслеживать статус поданных представлений в режиме реального времени. Пользователям доступны различные операции с документами, в том числе поиск, фильтрация, сортировка, сохранение шаблонов документов. «Небосвод» самостоятельно формирует и отправляет планы полетов на основе одобренных органами ЕС ОрВД представлений на установление местного или временного режима.

Таким образом, функциональные возможности геосервисов с информацией о структуре воздушного пространства, доступных широкому кругу пользователей, следующие:

- оперативная проверка возможности выполнения полета БВС без установления местного или временного режимов;
- предоставление массовому пользователю пространственно-временной и атрибутивной информации о структуре воздушного пространства в относительно простой форме;
- составление формализованных документов, необходимых для использования воздушного пространства (геосервисы «СППИ», «Небосвод» и «Flydrone»);
- функция «посредника» между пользователем воздушного пространства и органами ЕС ОрВД в части, касающейся передачи документов об использовании воздушного пространства (геосервисы «СППИ» и «Небосвод») [59].

До разработки вышеперечисленных Интернет-ресурсов владельцы БВС пользовались геосервисом «Полетные планы» (Рисунок 1.5) [71], который предназначен для составления планов полетов эксплуатантами пилотируемых воздушных судов. Пользователи, применяющие БВС, использовали

предоставляемую информацию о структуре воздушного пространства РФ для составления представлений на установление режимов и планов полетов.

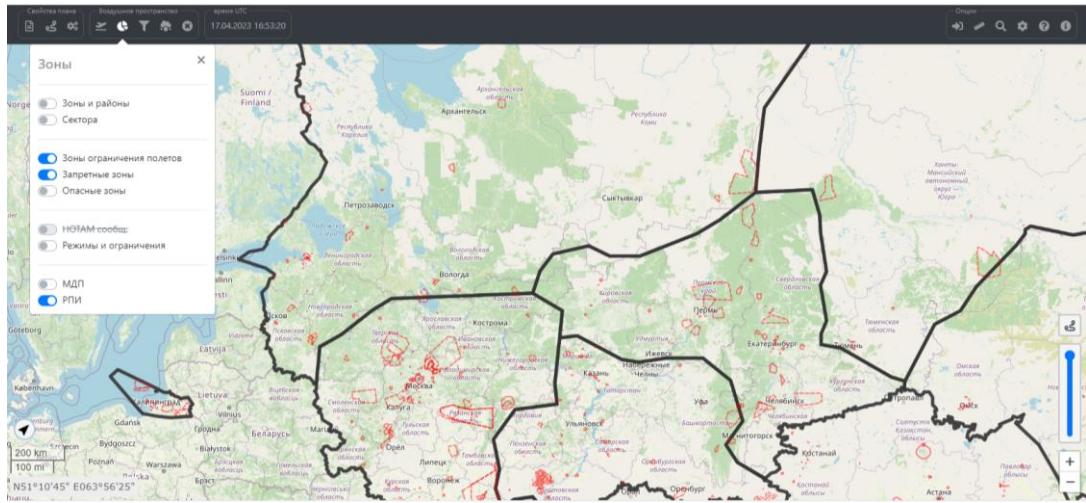


Рисунок 1.5 – Геосервис «Полетные планы»

Программное обеспечение для пилотирования БВС может содержать геоинформационную составляющую. В интерфейсе программного обеспечения (DJI Pilot, DJI GO, DJI Terra, Mission Planer, 2DNPU, Skat, Lichi, ZALA GCS, UGCS и другие) предусмотрена возможность просмотра геоизображения, на котором отображен планируемый или пройденный маршрут полета БВС. В программном обеспечении, используемом для управления БВС, не содержится информации о структуре воздушного пространства. Функции составления маршрута полета не предусматривают избегания препятствий.

Таким образом, поскольку установлено отсутствие специализированного геосервиса или геоинформационного программного обеспечения, содержащего модель воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов полетов БВС гражданской авиации, не допущенных к полетам в едином воздушном пространстве, следует применить полнофункциональные геоинформационные системы и их инструменты пространственного анализа для построения соответствующей тематической геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента. В данной модели следует учесть и структурировать следующие наборы данных:

- о рельефе местности и физико-географических и антропогенных объектах на поверхности земли;
- о метеорологических условиях;
- о пространственных объектах и элементах структуры воздушного пространства, в границах которых перемещение БВС запрещено или ограничено;
- о событиях и деятельности в воздушном пространстве и на земной поверхности, оказывающих влияние на полет БВС.

В полнофункциональных ГИС предусмотрен большой выбор инструментов для выполнения операций с наборами данных об объектах исследования и возможность написания и загрузки скриптов пользователей.

## **1.6. Геоинформационное моделирование воздушного пространства**

Область деятельности по планированию и применению БВС для решения широкого спектра задач, в том числе планирования перемещения из точки старта в точку назначения, включает в себя вопросы технической эксплуатации БВС, инфраструктуры, включающей средства связи, навигации, освещения обстановки, без чего невозможно выполнение полетов. В то же время во многом деятельность в данной области регламентируется нормативными требованиями.

Анализ предметной области показал:

1) более 90 % информации, связанной с организацией управления деятельностью по эксплуатации авиационно-транспортной системы эксплуатанта БВС имеет геопространственную составляющую.

2) В настоящее время более чем на 75 % управление и эксплуатацией БВС связано с руководящими документами.

3) В то же время для эффективного использования БВС, которые решают задачи в области авиационных работ и коммерческих воздушных перевозок, требуют специальных механизмов формализации и обработки больших объемов

геопространственной информации, связанной с представлением обстановки в зоне полетов, решаемыми задачами, рисками, связанными с беспилотной авиацией, инфраструктурой.

4) Эксплуатации БВС присущи риски, связанные с состоянием технических средств, средств инфраструктуры, опасными природными явлениями, орнитологической обстановкой, деятельностью других субъектов на земле и в воздушном пространстве.

5) Риски управления транспортной системой эксплуатанта БВС в моделируемом сегменте пространства.

Исходя из вышеизложенного, выявлены общее и ряд частных противоречий в области автоматизированного управления деятельностью по применению и эксплуатации БВС. Налицо общее противоречие между геоконтроллинговыми потребностями транспортной системы эксплуатанта БВС в сегменте воздушного пространства и отсутствием адекватного модельно-методического аппарата пространственно-временного представления, анализа и автоматизированного управления. Кроме того, выявлены частные противоречия:

1) между потребностью и отсутствием геоинформационной модели операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства,

2) между потребностью и методики оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки пространственно-содержательных рекомендаций.

Этот аппарат практически является геоинформационным, он связан с обработкой больших массивов разнородной пространственно-временной информации. Для разрешения вышеуказанных частных противоречий предложена следующая постановка задач исследования:

1) Разработка геоинформационной модели операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства.

2) Разработать методику оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработка пространственно-содержательных рекомендаций.

Соответственно, исследование нацелено на разрешение вышеописанного общего противоречия. Таким образом, цель исследования – разработка модельно-методического аппарата геоинформационного представления и регулирования рисковой БВС-активности.

Логика постановки цели и задач исследований на основе выявленных общего и частных противоречий проиллюстрирована Рисунком 1.6.

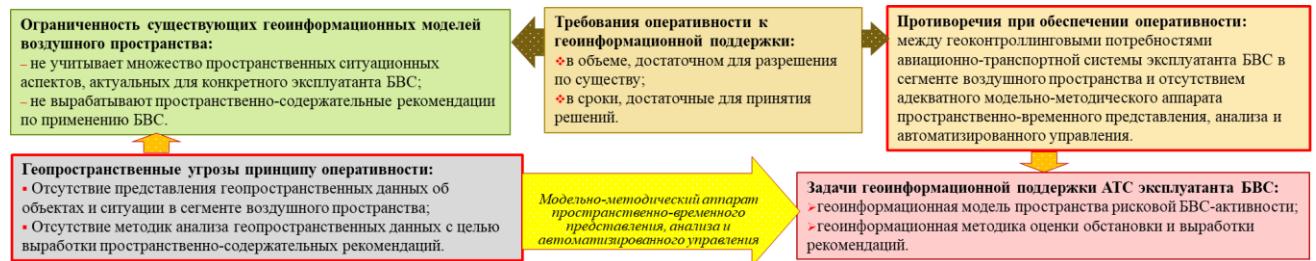


Рисунок 1.6 – Логика постановки цели и задач исследований.

На основании анализа проблемных вопросов предметной области территориальной рисковой БВС-активности сформулирована следующая формальная постановка задач исследования (Рисунок 1.7):

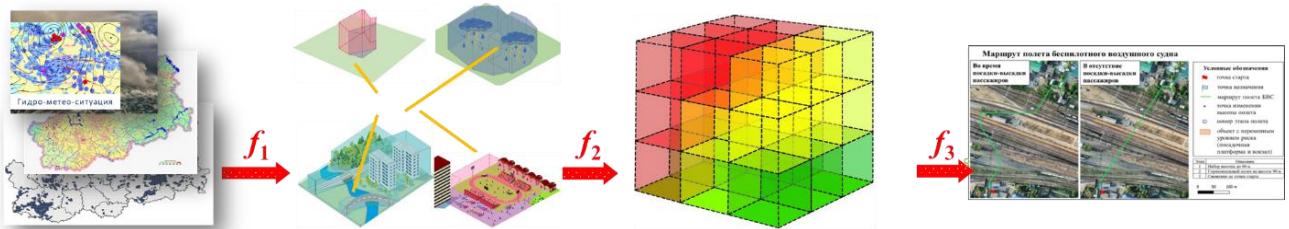


Рисунок 1.7 – Формальная постановка задачи исследования.

- 1) f<sub>1</sub> – построить отображение предметной область в геоинформационную модель воздушного пространства,
- 2) f<sub>2</sub> – построить отображение геоинформационной модели воздушного пространства в модель функционального и операционного воздушного пространства,

- 3)  $f_3$  – построить отображение пространства рисковой БВС-активности в множество пространственно-содержательных рекомендаций по регулированию рисковой пространственной БВС-активности.

### **Выводы по первой главе**

Воздушное пространство – сложная система, локализованная в установленных границах и функционирующая по определенным законам и правилам, указанным в нормативно-правовых актах соответствующего иерархического уровня. Геоинформационное моделирование воздушного пространства или его сегмента имеет особенности, обусловленные спецификой объекта моделирования.

Совокупность слоев пространственно-временных и атрибутивных данных, содержащих информацию об элементах структуры и других объектах, образует составные геоинформационные модели воздушного пространства, которые представлены на геосервисах для широкого круга пользователей. В данных ресурсах не реализована возможность синтеза новых пространственных данных, в том числе вычисление оптимальных маршрутов БВС из точки старта в точку назначения. В программном обеспечении для управления БВС невозможно построение оптимального маршрута полета в воздушном пространстве по причине отсутствия информации о воздушном пространстве. Пользователи выполняют построение маршрута без использования специализированных инструментов геоинформационного анализа. При составлении маршрутов полетов физические лица могут иметь некоторую субъективность суждений. В свою очередь, выполнение полетов по субоптимальным маршрутам увеличивает издержки.

Таким образом, для функционирования инструмента автоматизированного построения оптимальных маршрутов полетов БВС в воздушном пространстве

необходима актуальная корректная геоинформационная модель воздушного пространства, предназначенная для решения поставленной задачи. Данная модель должна содержать не только модели элементов структуры воздушного пространства, но и тематическую информацию о значимых физико-географических факторах и материальных объектах антропогенного происхождения, а также об индивидуальных, необходимых для пользователя составляющих. Для построения указанной модели целесообразно использовать полнофункциональную геоинформационную систему с созданием соответствующего тематического проекта для систематизации данных. Для построения и использования данной модели в деятельности эксплуатанта БВС необходимо разработать соответствующую методику. Геоинформационные системы являются эффективным инструментом решения пространственных задач, в том числе выявление, фиксация, учет и использование пространственных отношений между объектами на поверхности Земли и в воздушном пространстве.

## **2 РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА БВС-АКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАНТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

В настоящей главе разрабатывается геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации. Модель включает в себя формализмы, описывающие два базовых пространства БВС-активности: а) функционального пространства (описывает квазистационарные факторы геосреды, в которой функционирует авиационно-транспортная система эксплуатанта); б) операционного пространства (описывает динамические факторы геосреды, в которой функционирует авиационно-транспортная система эксплуатанта). Часть воздушного пространства или его сегмента, в котором выполняется или планируется выполнение деятельности с применением БВС, следует считать пространством БВС-активности. Осуществляя сбор и обработку необходимой пространственно-временной информации, необходимой для моделирования воздушного пространства с целью планирования полетов, эксплуатант формирует геоинформационную модель БВС-активности. Пространство, в котором полет БВС конкретного эксплуатанта возможен, является функциональным. Функциональное пространство БВС-активности содержит две составляющие: директивно-контроллинговую и киберфизическую. Киберфизическкая геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта подразумевает, что данное пространство (AASp), наблюдаемо (CSp), контролируемо (NSp) и управляемо (MSp) (Рисунок 2.1). Директивно-контроллинговая модель пространства БВС-активности находится в пределах доступного воздушного пространства, не имеющего ограничений для пилотирования БВС. Таким образом, для построения директивно-контроллинговой модели пространства БВС-активности необходимо построить

модели ограничений в воздушном пространстве или его сегмента и, таким образом, выполнить моделирование допустимой зоны перемещения БВС.

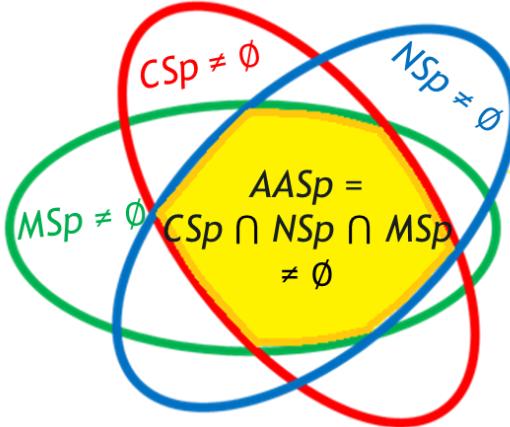


Рисунок 2.1 – Киберфизическая модель функционального пространства рисковой БВС-активности.

Геоинформационная модель операционного пространства рисковой БВС-активности включает в себя модель геосреды и модель авиационно-транспортной системы эксплуатанта БВС. Построение модели геосреды включает состоит в наполнении тематической разнородной пространственно-временной информацией, значимой для планирования деятельности по применению и эксплуатации БВС. Данная информация подлежит структурированию и упорядочиванию с целью уменьшения уровня информационной неопределенности. Модель геосреды состоит из совокупности моделей геопространственных мероприятий, а модель авиационно-транспортной системы эксплуатанта учитывает состояние БВС и экипажей.

## **2.1 Концептуальная модель ограничений для полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве**

Связующим звеном между получением пространственных данных и их использованием является геоинформатика [40]. Выявление и фиксация

пространственных отношений между объектами и процессами является одной из главных задач геоинформатики транспорта [101, 107]. Общим компонентом моделирования различных видов транспортных процессов является перемещение материальных тел при наличии естественных или искусственных ограничений в пространстве [88, 98]. Соответственно, одной из составляющих решения задачи по построению оптимального маршрута полета конкретного БВС из точки старта в точку назначения является моделирование различных видов ограничений для полета [56]. Понятие «ограничение в воздушном пространстве или его сегменте» (далее – ограничение) не следует связывать исключительно с элементами структуры воздушного пространства, перечисленными в [74]. Например, воздушное пространство над населенным пунктом не названо элементом структуры воздушного пространства, но полеты БВС в данных участках выполняются только при наличии разрешения от соответствующих органов местного самоуправления. Таким образом, для описания данного и подобных случаев целесообразно применять термин «ограничение». Исходя из изложенного, термин «элемент структуры воздушного пространства» не является тождественным термину «ограничение». В геоинформационной модели воздушного пространства, используемой для функционирования инструментов построения оптимальных маршрутов полетов БВС, должны быть учтены те виды ограничений, в которых выполнение полетов БВС запрещено или невозможно по объективным причинам. Такое моделирование позволяет исключить («стереть») участки с актуальными пространственно-временными ограничениями, и таким образом определить допустимую зону перемещения над земной поверхностью. Понятие «ограничение в воздушном пространстве или его сегменте» отражает сущность объектов и явлений, наличие которых препятствует полету БВС. В настоящей работе выполняется описание моделей ограничений, актуальных для планирования полета из точки старта в точку назначения.

Описание объекта или явления выполняется с применением различных средств: письменно, с помощью естественного языка, графически и другими

средствами [20]. Применение современных средств геоинформационного моделирования требует наличия набора формализованных данных о соответствующей предметной области. Формализованное представление объектов исследования служит основой для дальнейшего изучения и получения новых знаний [108]. Одной из значимых функций формализации является качественное выявление содержания через форму [36]. Формализация необходима для повышения объективности анализа информации с помощью отделения субъекта и субъективных методов оценки от содержательной части [36]. Для геоинформационного моделирования объекта необходимо соответствующее формализованное описание, основная цель которого – представление частей исследуемого объекта как по отдельности, так и в совокупности. Модель в ГИС организована по дуальному принципу. Геоинформационный подход к моделированию подразумевает создание графических моделей и связывание их с [39] векторными слоями или базами данных. В геоинформатике формализация является инструментом формирования представлений о конкретной предметной области в виде элементов формальной системы.

Основой анализа и построения сложных информационных конструкций являются информационные единицы [6]. В технологическом процессе информационные единицы могут быть рассмотрены как элементарные информационные модели [40]. Кроме того, информационные единицы служат средством научного описания и информационного взаимодействия.

Графические информационные единицы служат основой визуализации и виртуализации [18]. Основой построения визуальных моделей ограничений в воздушном пространстве служат графические информационные единицы, представляющие собой трехмерные геометрические (стереометрические) фигуры. Трехмерные информационные единицы появились вследствие развития технологий графических информационных единиц и виртуального моделирования [26]. В дисциплинах, связанных с географией, образ неотделим от структур пространственного мышления [33]. Образ воспроизводит существенно важные

логически взаимосвязанные детали объекта моделирования. Географические образы (геообразы, геопространственные образы) – это устойчивые пространственные представления, компактные модели географической реальности, сформированные в результате человеческой деятельности [33]. Описание с применением геообразов существенно богаче традиционных картографических описаний [89].

В свою очередь, представление геообразов опирается в том числе на содержание текстов различного происхождения. Для описания ограничений в воздушном пространстве понятие «геообраз» актуально по причине того, что не все их пространственные границы материализованы. Образ какого-либо объекта или явления актуально представить с применением графического элемента. Графическое и цветовое представление дополняют видение объекта или явления [20].

Помимо графических элементов, соответствующих геообразам, следует учитывать, что при теоретическом описании геоинформационных моделей важна однозначность восприятия и использования неграфических характеристик объектов. Поэтому необходима систематизация пространственных, временных и атрибутивных данных об объектах моделирования. Информационные единицы могут быть использованы для установления структуры объекта. Средством систематизации данных в теоретическом описании в настоящей работе являются формулы. Параметры, применяемые в формулах, систематизированы в таблицу.

Описание геоинформационных моделей ограничений для полетов БВС (обозначим ограничение как  $Z_i$ ) включает возможные варианты графического представления и формулы, учитывающие пространственно-временные и атрибутивные характеристики объекта. В геоинформатике базовой (простой) информационной единицей является точка. Для описания отрезков и полигонов необходимо несколько точек, поэтому данные информационные единицы являются производными (составными). Информационные единицы, образованные

из базовых геоинформационных единиц, используемые для описания формы ограничений в воздушном пространстве, также являются производными.

В целях построения геоинформационной модели воздушного пространства необходима декомпозиция информации об ограничениях для полетов БВС на три качественные группы «место», «время», «тема» [54]. В геоинформационной модели указанные группы интегрируются в единую систему, что создает синергетический эффект [11, 70]. Совокупность ограничений (обозначим как  $Z$ ) в воздушном пространстве или его сегменте, актуальных для планирования конкретного полета БВС, следует выразить формулой (2.1):

$$Z = \{Z_i, i=1, N\} \quad (2.1)$$

В свою очередь, модель ограничения в воздушном пространстве следует описать формулой (2.2):

$$Z_i = \Phi (C_i, Pt_i, A_i) \quad (2.2)$$

где  $C_i$  – группа «место» – совокупность пространственных (координаты и высоты) параметров ( $i=1, n$ );

$Pt_i$  – группа «время» – совокупность временных параметров ( $i=1, m$ );

$A_i$  – группа «тема» – совокупность тематических параметров объекта моделирования ( $i=1, k$ ) [53, 56, 95].

Теоретическое описание и реализация геоинформационных моделей различных типов ограничений в воздушном пространстве выполняется на основе формулы (2.2). Для формул данных предусмотрены параметры, систематизированные в таблице 2.1. Параметры, не внесенные в таблицу 2.1, обозначены в описании формул. Таблица 2.1 выполнена на основе публикации [56].

Таблица 2.1. – Параметры для описания ограничений в воздушном пространстве с применением формул

Параметр	Обозначение
Воздушное пространство	ВП
Уникальное название (номер) БВС	J
Воздушное пространство, доступное для полета j-го БВС	ВП <sub>j</sub>
Совокупность ограничений в воздушном пространстве	Z
Совокупность ограничений по метеорологическим условиям	Z <sub>m</sub>
Совокупность наземных материальных пространственных объектов, ограничивающих перемещение БВС	Z <sub>n</sub>
Совокупность исключений из ограничений в воздушном пространстве	Z <sub>искл</sub>
Уникальное название ограничения в воздушном пространстве	I
i-е ограничение в воздушном пространстве	Z <sub>i</sub>
исключение в i-м ограничении для j-го БВС	Z <sub>j(i)</sub>
<b>Группа параметров «место» (Ci)</b>	
N-я точка	P <sub>n</sub>
Абсолютная широта N-й точки	X <sub>n</sub>
Абсолютная долгота N-й точки	Y <sub>n</sub>
Точка центра	P <sub>ц</sub>
Абсолютная широта точки центра	X <sub>ц</sub>
Абсолютная долгота точки центра	Y <sub>ц</sub>
Ограничение по высоте сверху	H <sub>в</sub>
Ограничение по высоте снизу	H <sub>н</sub>
Радиус	R
Радиус большой оси	R <sub>б</sub>
Радиус меньшей оси	R <sub>м</sub>
Азимут	A
Буферная зона	БЗ
Размер буферной зоны	s
Направление буферной зоны	d
<b>Группа параметров «время» ( Pt<sub>i</sub>)</b>	
дата	D <sub>i</sub>
время начала	Pt <sub>i</sub> <sup>нач</sup>
продолжительность	Pt <sub>i</sub> <sup>прод</sup>
постоянное действие ограничения	∞
<b>Группа параметров «тема» (A<sub>i</sub>)</b>	
уникальное название ограничения	A <sub>i</sub> <sup>назв</sup>
ограничение по причине несоответствия метеорологических условий эксплуатационным ограничениям БВС	A <sub>i</sub> <sup>мет</sup>
ограничение по причине необходимости соблюдения условий эшелонирования	A <sub>i</sub> <sup>эш</sup>
исключение из ограничения	A <sub>j</sub> <sup>искл</sup>

В формулах для распределения параметров по группам «место», «время» и «тема» используются знаки «[» и «]», а для разделения параметров и групп знак «,». В данных формулах предусмотрено использование символа «Ф» для обозначения функции геоинформационного моделирования ограничения в воздушном пространстве, в фигурных скобках указаны параметры функции. Некоторые переменные из таблицы 2.1 предназначены не только для обозначения параметра, но и для описания функции, реализуемой в среде ГИС, в частности: символ «Р» обозначает функцию точки с координатами, Бз – образование буферной зоны от линии. Для описания ограничений в воздушном пространстве в нормативно-правовых актах используются географические координаты и время UTC.

В целях систематизации информации ограничения для полетов БВС в воздушном пространстве следует разделить на три основных типа:

- ограничения, обусловленные содержанием нормативно-правовых актов соответствующего уровня и территориального охвата;
- ограничения по метеорологическим условиям;
- ограничения по причине наличия наземных материальных объектов.

В целях упорядочивания информации об ограничениях в воздушном пространстве Российской Федерации выполнен анализ воздушного законодательства с позиции геоинформатики. Данные ограничения разделены на две категории:

- 1) ограничения, обусловленные структурой воздушного пространства;
- 2) ограничения, обусловленные классификацией воздушного пространства.

Помимо вышеперечисленных основных типов и категорий ограничений для решения определенных тематических задач в геоинформационную модель воздушного пространства пользователь может внести дополнительные ограничения.

## **2.2. Геоинформационное моделирование ограничений, обусловленных структурой воздушного пространства**

Ограничения в воздушном пространстве данной категории могут быть установлены для всех категорий и типов воздушных судов или выборочно. Данные ограничения для полетов могут быть распространены на воздушные суда с учетом таких критериев как цель полета, максимальная взлетная масса, вид авиации и иных критериев, регламентируемых нормативно-правовыми документами соответствующего иерархического уровня. Для описания ограничений используются пары координат и отметки высоты. Выявлены следующие категории ограничений первой группы в воздушном пространстве для выполнения полетов БВС:

1) Первая группа содержит ограничения, установленные нормативно-правовыми документами федерального уровня:

- запретные зоны [75];
- постоянные опасные зоны [78];
- постоянные и временные зарезервированные зоны ограничения полетов [77];
- специальные зоны;
- приграничная полоса (при выполнении авиационных работ) [74];
- участки воздушного пространства над населенными пунктами [74].

2) Вторая группа включает ограничения, устанавливаемые по представлению в органы ЕС ОрВД:

- ограничения, установленные с применением извещений, содержащих аeronавигационную информацию (NOTice To Air Missions – NOTAM) [73], в том числе местные и временные режимы, временные опасные зоны, установленные в интересах других пользователей [74].

3) Третья группа содержит ограничения, установленные приказами регионального уровня:

- запреты на полеты различных категорий БВС, установленные органами власти регионального уровня.

Исходя из анализа нормативных документов Российской Федерации [74,75, 77, 78, 81] с позиции геоинформационного моделирования, следует предложить следующие варианты графических элементов геоинформационных моделей вышеперечисленных групп ограничений в воздушном пространстве, которые могут быть выражены с применением трехмерных графических (стереометрических) элементов (Таблица 2.2). Трехмерное моделирование объектов и явлений является одной из современных тенденций развития геоинформатики [2].

Таблица 2.2. – Трехмерные графические (стереометрические) элементы, используемые для описания ограничений по причине наличия элементов структуры воздушного пространства

Ограничение в воздушном пространстве	Стереометрический элемент			
	Прямоугольная призма	Цилиндр	Эллиптический цилиндр	Прямая многоугольная призма, образованная по контуру буферной зоны
Запретная зона	✓	✓	✓	–
Постоянная опасная зона	✓	✓	✓	–
Специальная зона	✓	✓	✓	–
Постоянная или временно зарезервированная зона ограничения полетов	✓	✓	✓	–
Участок воздушного пространства над населенным пунктом	✓	–	–	–
Приграничная полоса	–	–	–	✓
Ограничения, установленные с применением извещений, содержащих аeronавигационную информацию	✓	✓	–	✓
Запрет на полеты БВС в регионе РФ	✓	–	–	–

Исходя из изложенного, группа параметров «место» может быть выражена формулами, соответствующими типам геометрических элементов, используемых в ГИС для моделирования ограничений в воздушном пространстве. В формулах содержатся параметры, систематизированные в таблице 2.1.

Таким образом, ограничение в воздушном пространстве в форме прямоугольной призмы (пример на Рисунке 2.2) следует описать следующей формулой (2.3):

$$Z_i = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_i^{назв}, A_j^{искл}] \} \quad (2.3)$$

В свою очередь, ограничение в форме цилиндра (пример на Рисунке 2.2) можно описать формулой (2.4):

$$Z_i = \Phi \{ R, [P_{ц}(X_{ц}, Y_{ц}), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_i^{назв}, A_j^{искл}] \} \quad (2.4)$$

Для описания ограничения в форме эллиптического цилиндра (пример на Рисунке 2.2) предложена формула (2.5):

$$Z_i = \Phi \{ [R_b, R_m, A, P_{ц}(X_{ц}, Y_{ц}), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_i^{назв}, A_j^{искл}] \} \quad (2.5)$$

Модель ограничения в воздушном пространстве в виде прямоугольной призмы (Рисунок 2.2), построенной с применением функции буфера относительно линии, описанной точками с координатами, следует выразить формулой (2.6):

$$Z_i = \Phi \{ B3 [s, d, P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_i^{назв}, A_j^{искл}] \} \quad (2.6)$$

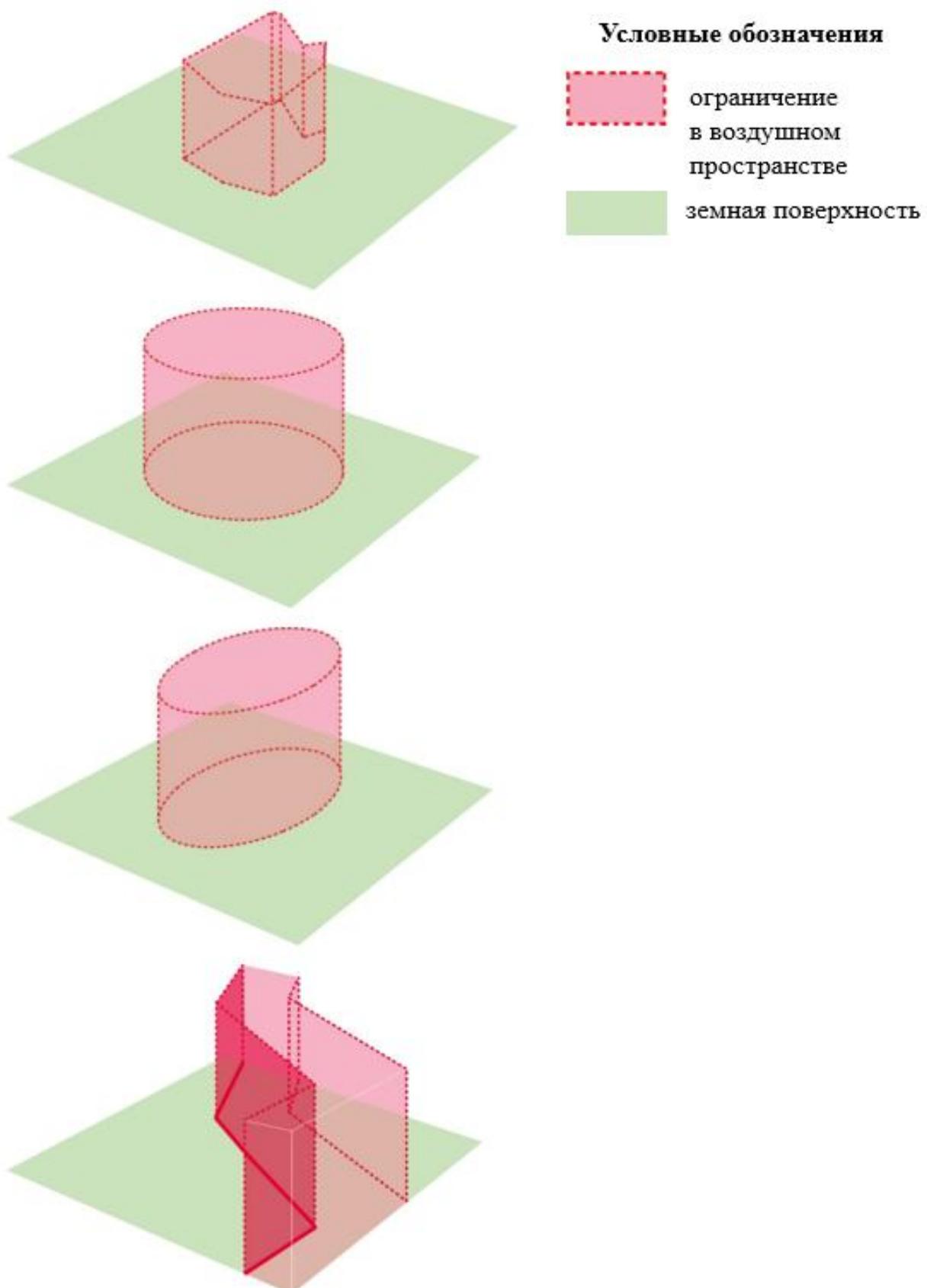


Рисунок 2.2 – Примеры геообразов моделей ограничений в воздушном пространстве

Параметры абсолютной широты и абсолютной долготы точек, используемых для моделирования ограничений в воздушном пространстве, измеряются в географических градусах, минутах и секундах. Высота нижней и верхней границы ограничений измеряется в десятках метров.

Для пилотирования БВС внутри данных ограничений возможно попытаться получить разрешение на определенный интервал времени у субъекта, в интересах которого данное ограничение установлено. Такое разрешение может быть получено для выполнения полета конкретного БВС в границах запретных зонах, опасных зонах, специальных зонах, постоянных или временных зонах ограничения полетов, в приграничной полосе, в воздушном пространстве над населенными пунктами, в местных и временных режимах. Данные разрешения должны быть учтены в геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента в качестве исключений из ограничений (далее – исключения). В ограничении для полета БВС может быть получено множество исключений для одного или нескольких БВС [56]. Совокупность исключений для конкретного полета БВС можно выразить следующей формулой (2.7):

$$Z_{\text{искл}} = \{Z_j(i), j=1, M\} \quad (2.7)$$

Исключение для БВС из ограничения для перемещения в воздушном пространстве, также может быть выражено формулой (2.8):

$$Z_j(i) = \Phi (C_j, Pt_j, A_j), \quad (2.8)$$

где  $C_j$  – группа «место» – совокупность пространственных параметров ( $j=1\dots p$ );

$Pt_j$  – группа «время» – совокупность временных параметров ( $j=1\dots q$ );

$A_j$  – группа «тема» – совокупность тематических параметров ( $j = r$ ) [56].

Примеры геообразов исключений для J-го БВС в модели I-го ограничения показаны на Рисунке 2.3.

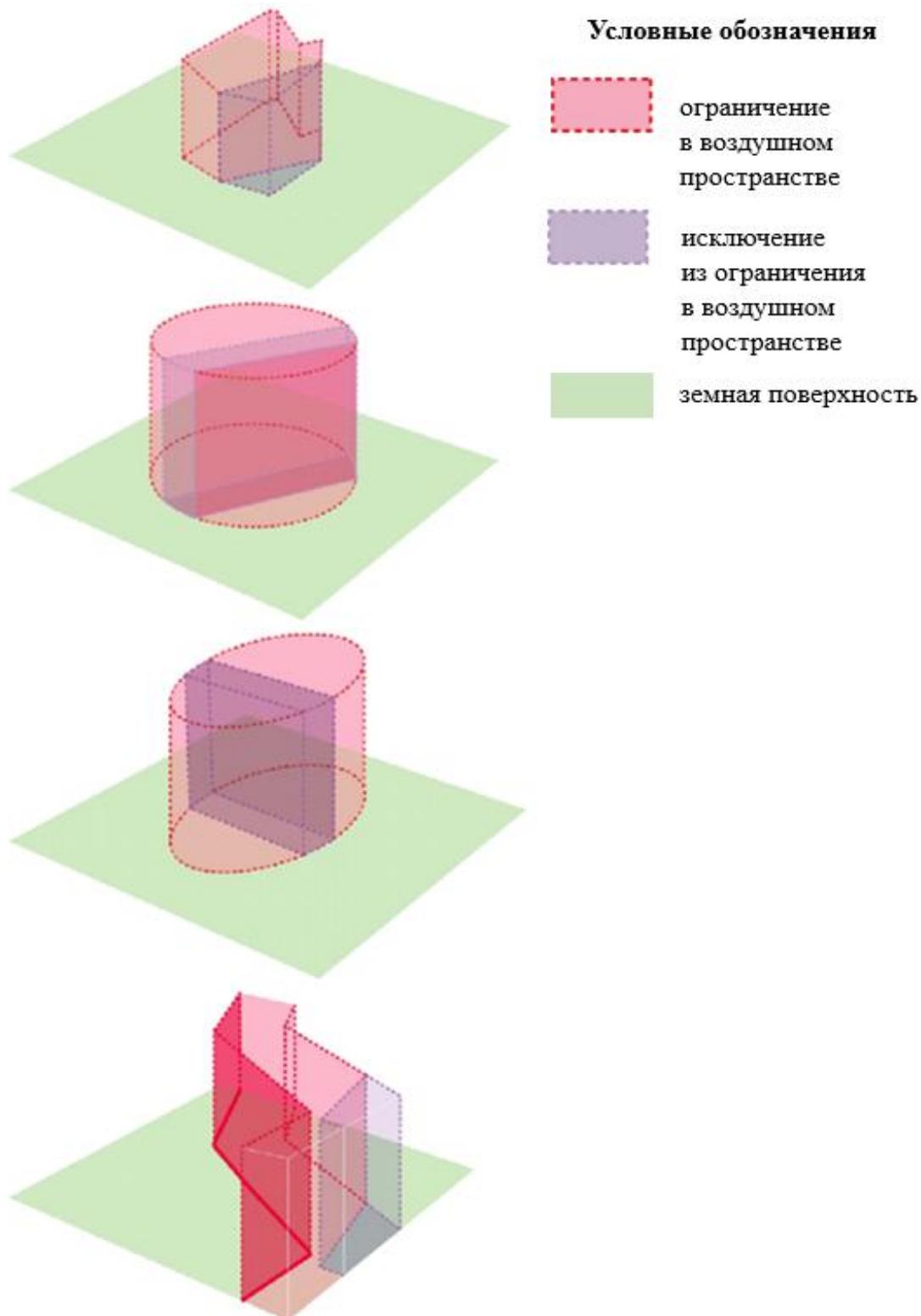


Рисунок 2.3 – Примеры геообразов ограничений в воздушном пространстве с исключениями для J-го БВС.

В нормативно-правовых документах не регламентировано, какую геометрическую форму могут иметь исключения из ограничений. Исходя из личного опыта профессиональной деятельности автора, в разрешениях на пилотирование БВС внутри ограничений используется описание формы исключения, которое может быть выражено в ГИС с применением графических элементов типа «многоугольник», «окружность» или «буферная зона от линии». Таким образом, для описания типовых моделей исключений из ограничений следует предложить формулы (2.9, 2.10, 2.11).

1) Для исключения из ограничения в воздушном пространстве в форме прямой призмы следует предложить формулу (2.9):

$$Z_j(i) = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_j^{назв}, J, A_i^{назв}] \} \quad (2.9)$$

2) Для исключения в форме цилиндра предложена формула (2.10):

$$Z_j(i) = \Phi \{ R, [P_u(X_u, Y_u), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_j^{назв}, J, A_i^{назв}] \} \quad (2.10)$$

3) Исключение в форме прямоугольной призмы, построенной относительно линии, описанной точками с координатами, следует описать формулой (2.11):

$$Z_j(i) = \Phi \{ \text{Бз}[s, d, P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{нач}, Pt_i^{прод}], [A_j^{назв}, J, A_i^{назв}] \} \quad (2.11)$$

В случае, если исключений для J-го БВС не предусмотрено,  $Z_{искл} = \emptyset$ .

### 2.3. Геоинформационное моделирование ограничений, обусловленных классификацией воздушного пространства

В Российской Федерации установлены классы воздушного пространства А, С, G и Н, границы которых регламентированы нормативно-правовыми актами [75, 80]. Моделирование ограничений, связанных с классификацией воздушного пространства, обусловлено тем, что пилотирование БВС доступно не во всех классах воздушного пространства, а также необходимостью соблюдения условий рассредоточения воздушных судов на соответствующие интервалы, величина которых определяется положениями нормативно-правовых актов. Для описания указанных действий употребляют термин «эшелонирование» [75]. Исходя из изложенного, для моделирования ограничений, связанных с классификацией воздушного пространства, в первую очередь необходимо описать соответствующие модели участков классов.

В воздушном пространстве класса А невозможно выполнение полетов БВС в сегрегированном воздушном пространстве. В Российской Федерации класс А установлен на высоте от 8100 м (выше 265-го эшелона полета) – в верхнем воздушном пространстве. Для описания геоинформационных моделей воздушного пространства классов А и С или их участков целесообразно использовать параметры из таблицы 2.1. Таким образом, для БВС, не допущенных к полетам в воздушном пространстве класса А, есть постоянное ограничение, которое следует описать формулой (2.12), подготовленной на основе формулы (2.2):

$$Z_i = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [\infty], [A_i^{classA}] \}, \quad (2.12)$$

где  $H_b$  – верхняя граница класса А, равная 100000 м,

$H_h$  – нижняя граница класса А, равная 8100 м,

$[A_i^{\text{classA}}]$  – группа параметров «тема» содержит один параметр, указывающий на ограничение полет в классе А воздушного пространства, а остальные параметры соответствуют таблице 2.1.

Нижнее воздушное пространство разделено на классы С, Г и Н. В воздушном пространстве классов А и С соблюдение условий эшелонирования является обязательным (без исключений), в классах Г и Н эшелонирование воздушных судов не выполняется. На Рисунке 2.4 приведен пример того, как могут быть схематично изображены классы воздушного пространства А и С в геоинформационной модели сегмента воздушного пространства.

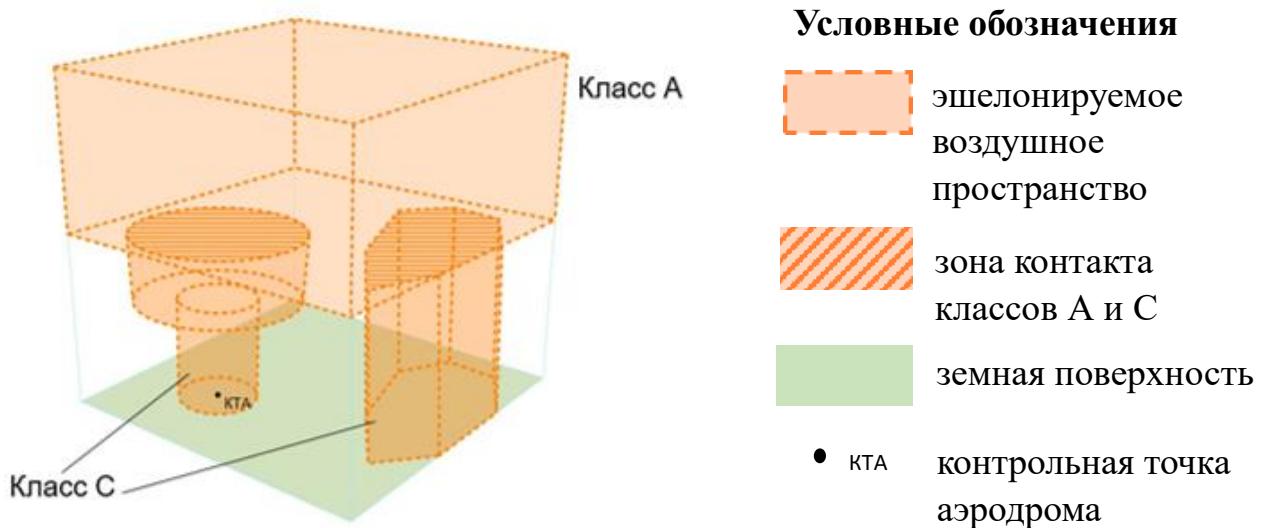


Рисунок 2.4 – Пример схематичного изображения классов А и С в модели сегмента воздушного пространства

В классе С выполняется диспетчерское обслуживание воздушного движения или управление полетами воздушных судов. Данная деятельность осуществляется:

- в районах контролируемых аэродромов;
- в границах местных воздушных линий;
- в границах участков воздушного пространства без аэродромов, указанные в приложении соответствующего нормативно-правового документа [79].

Координаты районов контролируемых аэродромов и регламенты работы, а также координаты и размеры местных воздушных линий опубликованы

в соответствующих сборниках аeronавигационной информации, опубликованных в открытом доступе [27].

Воздушное пространство района контролируемого аэропорта или местной воздушной линии классифицируется как воздушное пространство класса С только в период предоставления диспетчерского обслуживания, которое выполняется во время работы аэропорта согласно регламенту и во время официального выполнения полета воздушного судна по местной воздушной линии.

Исходя из анализа действующей редакции нормативно-правового документа [80], регламентирующего границы воздушного пространства класса С, и опубликованных сборников аeronавигационной информации [27], для описания моделей участков воздушного пространства класс С следует применить нижеперечисленные формулы.

Участки воздушного пространства, в которых может быть установлен класс С (обозначим как ВП<sub>С</sub>), а именно районы аэропортов и отдельные участки воздушного пространства, указанные в нормативно-правовом акте [79], в пространстве принимают форму полигона-многоугольника или полигона-окружности. Для описания моделей участков воздушного пространства класса С в форме прямой призмы и цилиндра предложены формулы (2.13, 2.14), в которых группа параметров «тема»  $[A_i^{classC}]$  содержит один параметр, указывающий принадлежность участка воздушного пространства к классу С, а остальные параметры соответствуют Таблице 2.1.

Таким образом, прямую призму, ограничивающую участок воздушного пространства класса С, следует описать формулой (2.13):

$$BPC = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_B - H_H)], [D_i, P_{ti}^{ нач }, P_{ti}^{ прод }], [A_i^{ classC }] \} \quad (2.13)$$

В свою очередь, цилиндр, в границах которого установлен класс воздушного пространства С, следует выразить формулой (2.14):

$$ВП_С = \Phi \{R, [P_{ii}(X_{ii}, Y_{ii}), (H_B - H_H)], [D_i, P_{ti}^{нач}, P_{ti}^{прод}], [A_i^{classC}]\} \quad (2.14)$$

Геоинформационную модель местной воздушной линии, на которой во время диспетчерского обслуживания полета воздушного судна устанавливается класс С, следует описать как прямую призму, образованную через построение буферной зоны от линии (2.15):

$$ВП_i = \Phi \{БЗ [s, d, P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_B - H_H)], [D_i, P_{ti}^{нач}, P_{ti}^{прод}], [A_i^{classC}]\} \quad (2.15)$$

Пример графического представления модели, соответствующей формуле (2.15) приведен на Рисунке 2.5.

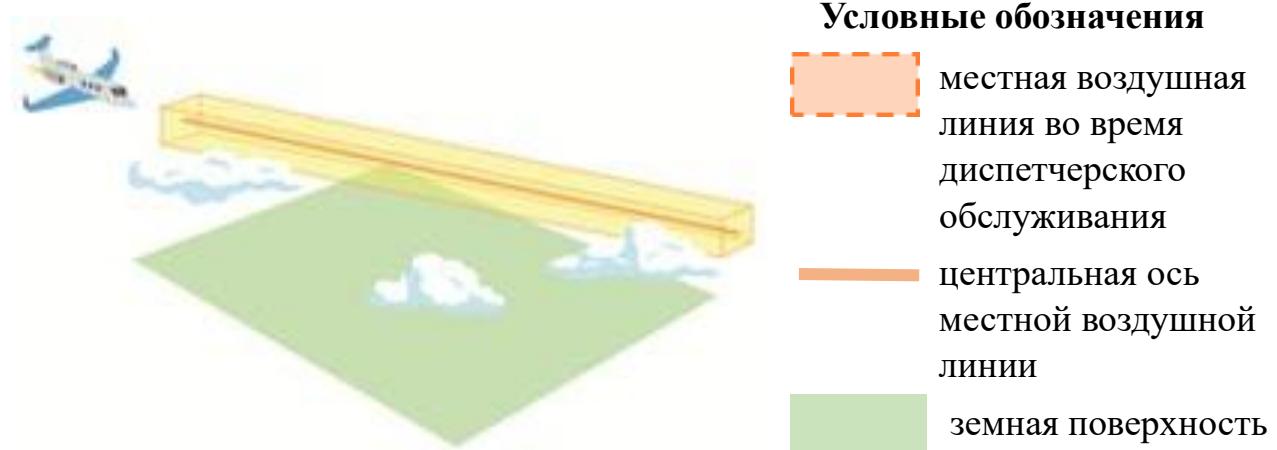


Рисунок 2.5 – Пример схематичного изображения классов участка маршрута обслуживания воздушного движения, на котором выполняется диспетчерское обслуживание

Воздушным законодательством предусмотрено установление интервалов вертикального и горизонтального (продольного, бокового) эшелонирования [82] в контролируемом воздушном пространстве. В положениях нормативно-правовых актов [74] предусмотрены критерии для определения величины интервалов эшелонирования воздушных судов. Соблюдение норм эшелонирования необходимо для недопущения конфликтных ситуаций между воздушными судами [72].

Вертикальное эшелонирование рассчитывается только относительно пилотируемых воздушных судов. Критерии для определения величины интервалов эшелонирования систематизированы в Таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Критерии для определения величины интервалов эшелонирования

Вид эшелонирования	Критерий
Вертикальное	Вид авиации
	Класс воздушного пространства
	Наличие допуска к применению сокращенных интервалов вертикального эшелонирования на воздушном судне
	Скорость полета
	Высота (эшелон) полета
Горизонтальное	Диспетчерское обслуживание (районное, в районе подхода или аэродромное)
	Параметры используемой БВС взлетно-посадочной полосы (если используется)
	Масса воздушного судна, за которым следует БВС
Продольное	Диспетчерское обслуживание (районное, в районе подхода или аэродромное)
	Выполнение пересечения попутного или встречного эшелона, занятого другим воздушным судном
	Вид выполняемого маневра воздушного судна
	Наличие контрактного автоматического зависимого наблюдения и связи «диспетчер-пилот»
	Навигационное обеспечение требуемых навигационных характеристик (Required navigation performance – RNP) и интервал донесения наблюдения

Моделирование пространственно-временных ограничений, связанных с соблюдением интервалов эшелонирования, возможно только относительно официально запланированных маршрутов полетов воздушных судов. В ином случае моделирование буферной зоны, построенной на основе величин интервалов эшелонирования, невозможно и, соответственно, не может быть учтено в расчетах.

В целях геоинформационного моделирования участка воздушного пространства, в котором невозможно выполнение полета БВС по причине необходимости соблюдения интервалов эшелонирования относительно Q-го воздушного судна, следует предложить следующую формулу (2.16):

$$Z_i(BC_Q) = \Phi \{ I_{\text{еш}} [P_1(X_1, Y_1, H_1), P_2(X_2, Y_2, H_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, H_n)], \\ [D_i, P_{ti}^{\text{нач}}, P_{ti}^{\text{прод}}], [A_i^{\text{еш}}, Q] \}, \quad (2.16)$$

где  $I_{\text{еш}}$  – совокупность интервалов эшелонирования в воздушном пространстве,

$Q$  – уникальное название воздушного судна ( $BC$ ).

Функцию интервалов эшелонирования  $I_{\text{еш}}$ , которые включают различные виды эшелонирования, следует предложить формулу (2.17):

$$I_{\text{еш}}(BC_Q) = I_{\text{еш}}^{\text{верт}}(BC_Q) \& I_{\text{еш}}^{\text{гор}}(BC_Q) \& I_{\text{еш}}^{\text{прод}}(BC_Q) \& I_{\text{еш}}^{\text{бок}}(BC_Q) \quad (2.17),$$

где  $I_{\text{еш}}^{\text{верт}}$  – интервал вертикального эшелонирования,

$I_{\text{еш}}^{\text{гор}}$  – интервал горизонтального эшелонирования,

$I_{\text{еш}}^{\text{прод}}$  – интервал продольного эшелонирования,

$I_{\text{еш}}^{\text{бок}}$  – интервал бокового эшелонирования.

Соблюдение интервалов эшелонирования между  $j$ -м БВС и другим воздушным судном следует описать с применением формулы (2.18):

$$BC_j^{xyzt} \oplus I_{\text{еш}}(BC_Q^{xyzt}), \quad t_{\text{бвс}} = t_{\text{bc}}, \quad (2.18)$$

где  $I_{\text{еш}}$  – совокупность интервалов эшелонирования в воздушном пространстве для  $i$ -го БВС,

$\text{BBC}_j^{xyzt}$  – функция, описывающая маршрут j-го BBC в пространстве в момент времени,

$\text{BC}_Q^{xyzt}$  – положение Q-го воздушного судна в пространстве в момент времени,

$t$  – время.

На Рисунке 2.6 схематично изображена гипотетическая ситуация в воздушном пространстве с соблюдением интервалов эшелонирования. В геоинформационном моделировании совокупность интервалов эшелонирования относительно точки пространственного положения j-го BBC в момент времени  $t$  графически представлена в виде цилиндра, высота которого соответствует величине интервала вертикального эшелонирования, а радиус – горизонтального эшелонирования.

#### Условные обозначения

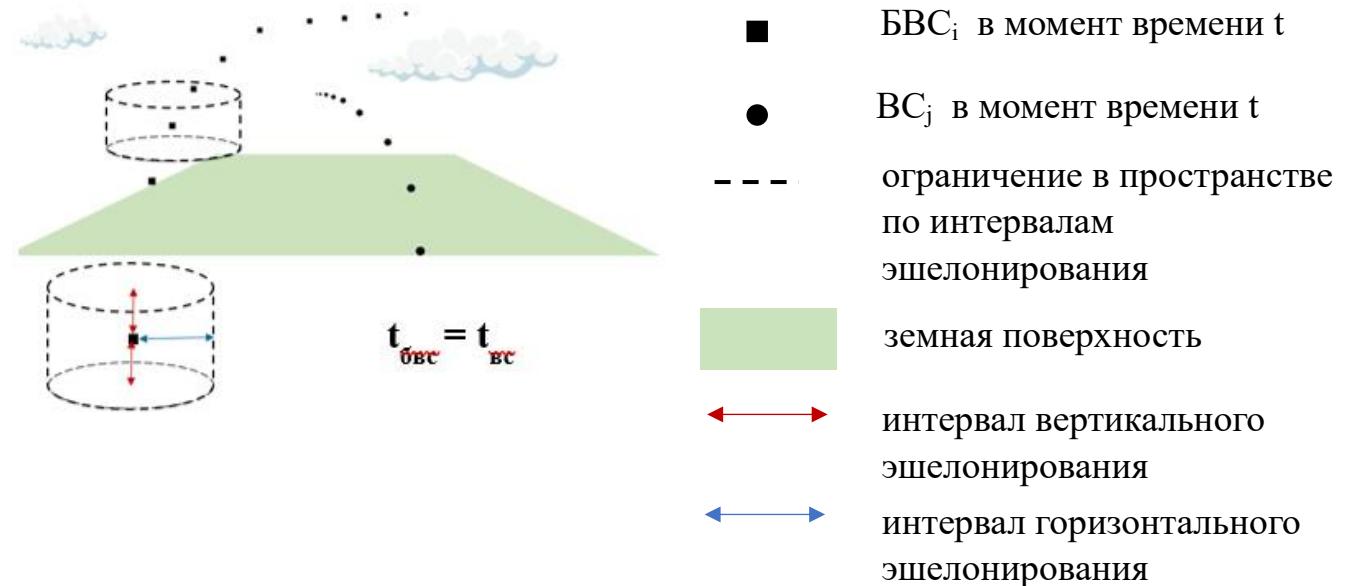


Рисунок 2.6 – Пример моделирования интервалов эшелонирования в воздушном пространстве

В свою очередь, в целях упрощения операций моделирования допустимо объединить подобные цилиндрические объекты, полученные в результате построения интервалов эшелонирования относительно запланированной

траектории полета воздушного судна, как показано на Рисунке 2.7, и упростить форму полученной фигуры.

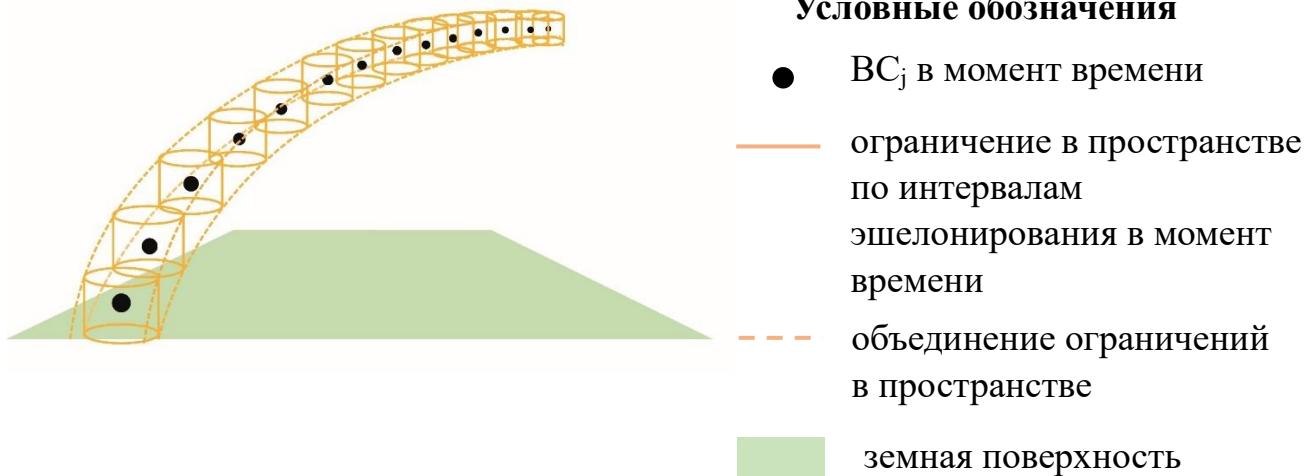


Рисунок 2.7 – Пример объединения участков, полученных при построении интервалов эшелонирования

В таком случае полученный участок воздушного пространства следует описать формулой (2.19):

$$Z_i(BC_Q) = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1, H_1), P_2(X_2, Y_2, H_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, H_n)], [D_i, P_{ti}^{\text{ нач}}, P_{ti}^{\text{ прод}}], [A_i^{\text{ юш}}, Q] \} \quad (2.19)$$

В нижнем воздушном пространстве вне сегментов, в которых установлен класс С, могут быть установлены классы G или H, в которых эшелонирование воздушных судов не предусмотрено. Класс воздушного пространства Н установлен на высоте менее 150 м от земной (водной) поверхности, за исключением приграничной полосы, а также на маршрутах полетов БВС в период пилотирования [74]. К полетам по данным маршрутам допускаются только те БВС, которые оснащены системой экстренного прекращения полета, проблесковыми огнями и другим оборудованием, предусмотренным требованиями [74]. Для всех остальных БВС при планировании полета следует учитывать маршрут полетов БВС в воздушном пространстве класса Н как еще одно ограничение.

Геоинформационную модель пространства маршрута полета БВС во время пилотирования, когда устанавливается класс Н, следует описать как прямую призму, образованную через построение буферной зоны от линии (2.21):

$$B\Pi_i = \Phi \{ \text{БЗ} [s, d, P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_B - H_H)], [D_i, P_{ti}^{\text{нач}}, P_{ti}^{\text{прод}}], [A_i^{\text{classH}}] \} \quad (2.21)$$

где  $[A_i^{\text{classH}}]$  – группа параметров «тема» содержит один параметр, указывающий на ограничение полет в классе Н воздушного пространства, а остальные параметры соответствуют таблице 2.1.

Пример графического представления модели, соответствующей формуле (2.21) приведен на Рисунке 2.8.

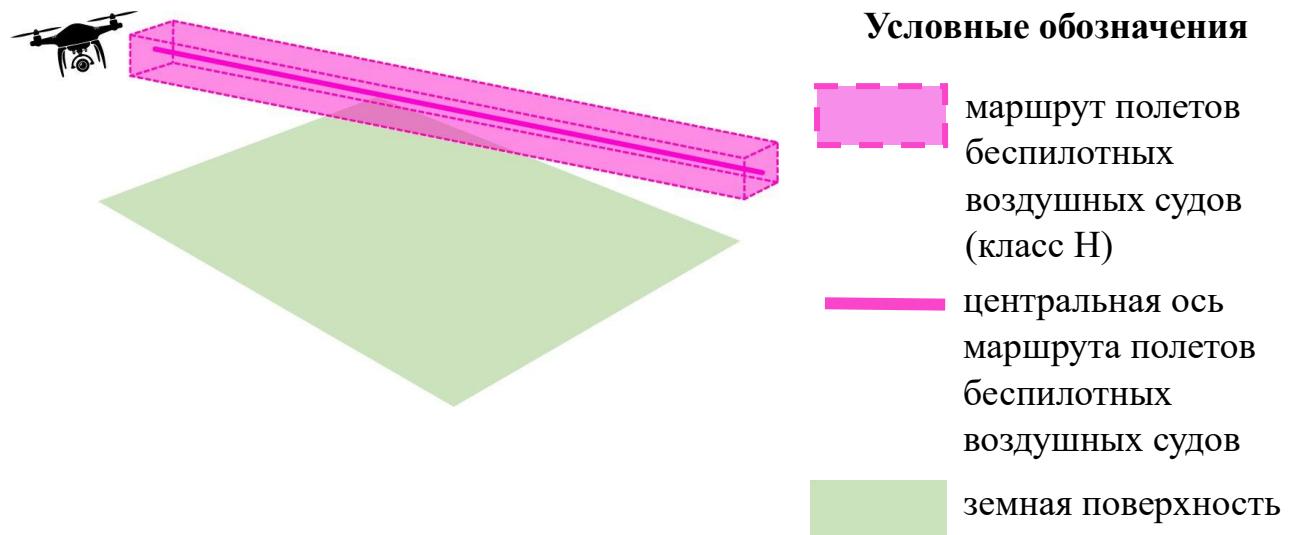


Рисунок 2.8 – Пример геообраза маршрута полета БВС, на котором выполняется пилотирование

В нижнем воздушном пространстве, не занятом классами С и Н, устанавливается класс Г. На Рисунке 2.9 изображен пример схематичного изображения классов С, Г и Н. Граница между классами воздушного пространства Г и Н не является препятствием для установления местного или временного режима.

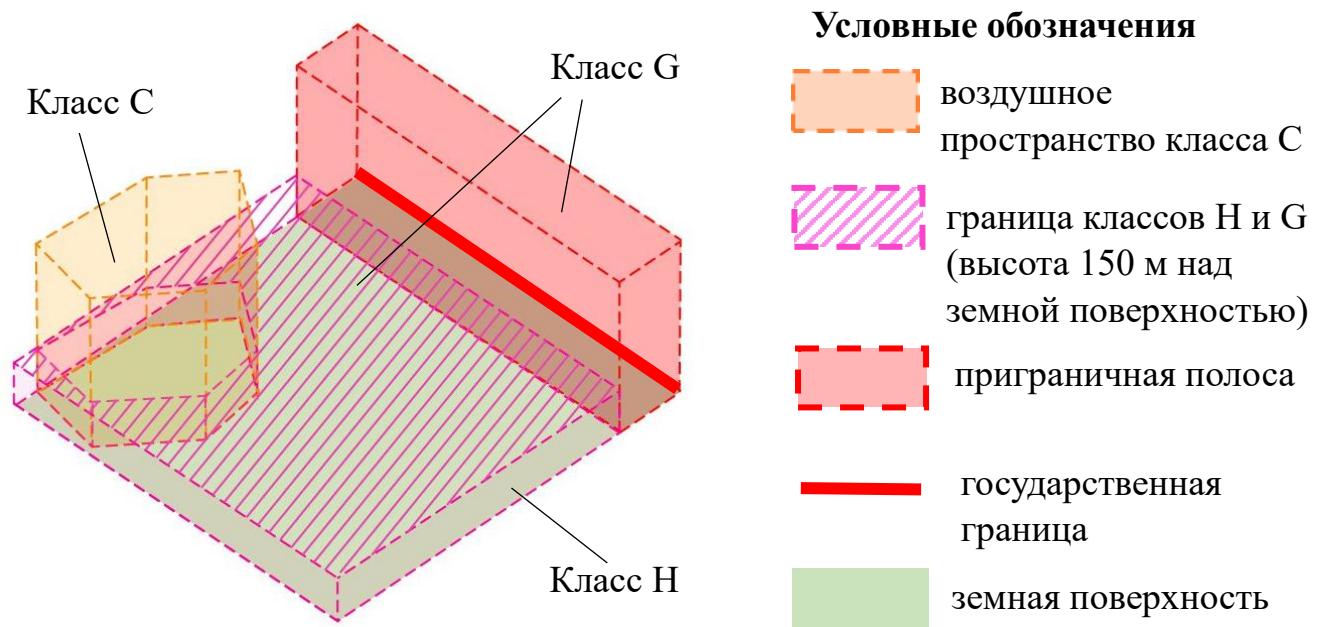


Рисунок 2.9 – Пример геообраза классов С, Г и Н в модели сегмента воздушного пространства

## 2.4 Геоинформационное моделирование ограничений в воздушном пространстве по метеорологическим условиям

При вычислении оптимального маршрута полета БВС должны быть учтены различные категории ограничений. Внешние пилоты в ходе планирования и выполнения полета БВС учитывают информацию о прогнозируемой погоде и климатических показателях. На взлет, полет по маршруту и посадку БВС различных типов оказывают влияние метеорологические факторы (скорость и направление ветра, температура воздуха, влажность и другие) [14]. Пилотирование в условиях, не соответствующих характеристикам БВС, заявленных производителем, повышает риск авиационного происшествия или инцидента и снижает эффективность применения БВС. В геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента должны быть учтены ограничения по метеорологическим условиям, значимые для перемещения БВС.

Вычисление оптимального маршрута полета должно выполняться с учетом технических характеристик БВС.

Наличие прогнозов погоды и другой метеорологической информации является необходимым условием функционирования современной гражданской авиации. Для планирования и выполнения эффективных и безопасных полетов различных типов и категорий воздушных судов необходимо соответствующее метеорологическое обеспечение [7].

В соответствии с международными стандартами и рекомендуемой практикой [84] в Российской Федерации разработан нормативно-правовой акт [83], регламентирующий обеспечение пользователей воздушного пространства метеорологической информацией. Информация о погоде предоставляется различным категориям пользователей в виде сообщений-сводок установленной формы без учета специфики типа воздушного судна [57]. Пользователям, выполняющим старты и посадки вне аэродромов, предлагается использовать зональные прогнозы погоды. При этом значительное количество стартов и посадок беспилотных воздушных судов различных типов выполняется со стартово-посадочных площадок вне аэродромов и вертодромов, а полеты выполняются на расстояния, несопоставимо меньшие по сравнению с районами прогнозирования погоды, опубликованных на геосервисе [4]. Таким образом, метеорологическое обеспечение пользователей воздушного пространства в Российской Федерации в значительной степени ориентировано на пилотируемую авиацию [57]. Специалисты, применяющие БВС для решения научных и прикладных задач, в ходе планирования полета учитывают информацию о прогнозируемой погоде, размещенную в сети Интернет и других источниках, ориентированных на широкий круг пользователей. Анализ метеорологической информации о прогнозируемой погоде с учетом технических характеристик БВС выполняется вручную, без применения геоинформационных инструментов автоматизированной обработки пространственных данных.

Анализ информации о явлениях и процессах в атмосфере, решение прикладных метеорологических задач при недостаточной плотности метеорологических станций [5], выполняется в том числе с использованием геоинформационных систем. Восстановление полей пространственного распределения температуры и характеристик влажности воздуха у земной поверхности, осадков, облачности, барической тенденции и других метеорологических элементов (далее – метеоэлементов) необходимо для выполнения прогнозов погоды [99]. Метеорологическая информация в ГИС-среде представлена в виде слоев точечных, линейных и полигональных объектов. Интеграция и анализ пространственной информации, полученной сетью метеорологических станций, системами получения данных дистанционного зондирования Земли и другими системами наблюдения, выполняется с использованием ГИС. Комплексирование метеорологической информации об одной и той же метеорологической величине из нескольких систем наблюдения с учетом их достоинств и недостатков позволяет повысить качество анализа и минимизировать ошибки [31, 32]. Поля пространственно-временного распределения метеорологических величин, уточненные в ходе, могут использоваться как для решения частных прикладных задач, так и в региональных и глобальных моделях прогноза погоды в качестве мезомасштабного сигнала.

В современной науке разработаны глобальные модели прогноза погоды (UKMet1, ПЛАВ, GFS, IFS, и другие). При этом продолжаются многочисленные региональные исследования атмосферы. Анализ мезомасштабных возмущений атмосферной циркуляции выполняется с учетом интерполяции полей температуры воздуха и давления у земной поверхности, их горизонтальных и вертикальных градиентов, а также рельефа местности [30]. Результаты применения региональных моделей прогнозирования погоды могут быть использованы в качестве мезомасштабного сигнала в более крупных моделях.

Для вычисления оптимального маршрута полета БВС необходим анализ фактической и прогнозируемой метеорологической обстановки. В ходе анализа необходимо выявить участки воздушного пространства, в которых выполнение полета невозможно по причине несоответствия погоды эксплуатационным ограничениям БВС, а значения метеоэлементов по траектории полета соответствуют техническим характеристикам транспортного средства. В современных геосервисах, предоставляющих картографическую информацию о структуре воздушного пространства [34, 69, 97, 119], не предусмотрена возможность анализа пространственно-временного распределения метеоэлементов [58]. На качественное изучение и анализ прогнозируемой погоды по маршруту полета вручную могут потребоваться значительные временные затраты, для снижения которых целесообразно использовать средства ГИС.

Эксплуатационные ограничения различных типов БВС содержатся в руководствах летной эксплуатации или опубликованы на сайтах производителей в сети Интернет. При планировании полета следует учитывать понижение температуры воздуха с набором высоты. Значение данного показателя должно быть в пределах температурного диапазона рабочей среды типа или единичного экземпляра БВС. Скорость ветра не должна превышать максимально допустимое для данного БВС значение. Запрет на выполнение полета БВС в условиях дождя, града, тумана, грозы может быть одним из множества эксплуатационных ограничений. В целях описания геоинформационной модели такого ограничения следует учитывать высоту нижней границы облаков. Если соответствующими документами производителем установлен запрет на полеты БВС внутри облаков, то модель такого ограничения может быть описана с использованием показателей нижней границы облаков и их вертикальной протяженности. Опасность для полетов БВС также создают облака вулканических извержений. По значению показателя степени защиты оболочки определяется способность к выполнению полетов в условиях наличия в атмосфере капель дождя, града, частиц пыли определенного диаметра. Если полет выполняется в условиях, не соответствующих

техническим характеристикам БВС, то данное транспортное средство подвергается повышенной опасности.

Для описания анализа ячеек полей распределения значений метеоэлементов следует предложить формулу (2.20):

$$I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{бвс} (m), \quad (2.20)$$

где  $I_{(x,y,z,t)}$  – ячейка поля с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ ,  
 $m$  – значение метеоэлемента,  
 $\Phi_{бвс}$  – функция для оценки степени соответствия значения метеоэлемента эксплуатационным ограничениям БВС [58].

По результатам анализа ячейкам полей пространственно-временного распределения метеоэлементов присваиваются значения согласно степени соответствия (несоответствия) техническим характеристикам БВС, диапазон значений – от 0 до 1. Для моделей объектов и явлений, задаваемых с применением полей пространственного распределения, применимо понятие геометризация с использованием геостатистики [102, 103], когда цифровая модель дополняется вероятностными характеристиками, отражающими размытость границ объекта или явления [11].

Объединенные смежные ячейки пространства, в которых невозможно выполнение полета БВС по причине несоответствия метеорологических условий техническим характеристикам, принимают вид многогранника, для описания которого предложена формула (2.21):

$$Z_i = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1, H_1), P_2(X_2, Y_2, H_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, H_n)], \\ [D_i, P_{ti}^{нач}, P_{ti}^{прод}], [A_i^{met}] \} \quad (2.21)$$

На Рисунке 2.10 приведен пример модели ограничения в пространстве по метеорологическим условиям, изображенной с применением трехмерного графического (стереометрического) элемента – прямоугольной призмы. Для описания данной модели применима формула (2.21).

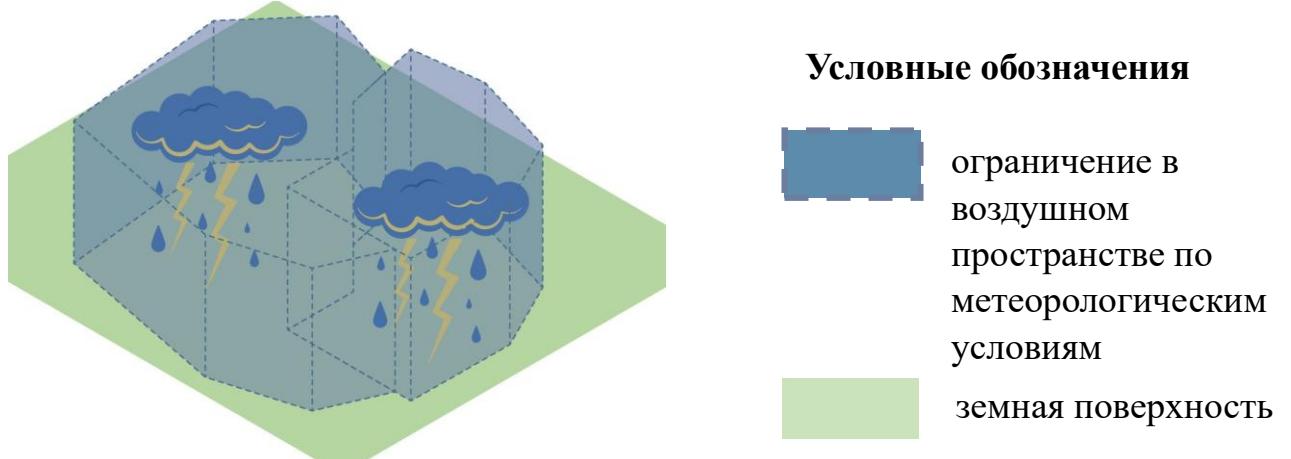


Рисунок 2.10 – Пример модели ограничения в воздушном пространстве по метеорологическим условиям

По аналогии с формулами (2.1) и (2.7), совокупность ограничений для конкретного полета БВС по метеорологическим условиям следует обозначить как  $Z_m$  и описать формулой (2.22):

$$Z_m = \{Z_{m_i}, i = 1, N\} \quad (2.22)$$

## 2.5 Геоинформационное моделирование наземных материальных пространственных объектов, ограничивающих перемещение беспилотных воздушных судов

Нижней границей воздушного пространства является поверхность земли, на которой расположены статичные или подвижные объекты. Облет наземных препятствий жизненно важен для применения воздушного транспорта [129].

Применение ГИС для построения виртуальных поверхностей (на основе ТИН), моделирующих ограничение по минимальной высоте для полетов воздушных судов в районе аэропортов, описано в научных работах [121]. Данная модель создается на основе анализа наземных препятствий для воздушных судов. Подобные модели используются для проектирования аэропортов и аэродромов, а также в планировании застройки прилегающей к ним территории зданиями и сооружениями, а также ее благоустройства.

Значительное количество полетов БВС выполняется с неподготовленных стартово-посадочных площадок. Наземные объекты в моделировании воздушного пространства целесообразно учитывать как ограничения для полетов БВС. Показатель высоты ограничения вычисляется исходя из высоты объекта на земной поверхности и рельефа местности. Таким образом, необходимым компонентом геоинформационной модели воздушного пространства является цифровая модель рельефа (далее – ЦМР). ЦМР содержит сведения о значении высотных отметок на поверхности земли. В ГИС-среде ЦМР может быть представлена в виде нерегулярной триангуляционной сети (ТИН), облака точек регулярной сетки (GRID), растровым файлом в формате GeoTIFF и другими способами.

Необходимый уровень детальности геоинформационных моделей наземных объектов, ограничивающих перемещение БВС, зависит от характеристик и конструктивных особенностей БВС, полетного задания и других значимых для решения поставленной задачи факторов. Моделирование наземных материальных объектов должно выполняться с точностью, достаточной для решения задачи построения оптимального маршрута полета БВС в воздушном пространстве. Избыточная детальность моделей таких ограничений может оказать негативное влияние на скорость работы инструментов вычисления оптимального маршрута. Уменьшение детализации трехмерных моделей материальных объектов, ограничивающих полет БВС, позволяет избежать информационной перегрузки [48]. Ниже приведены примеры моделирования наземных материальных

пространственных объектов, ограничивающих перемещение БВС. Модель наземного объекта может иметь типовой или детальный вид [25].

В качестве примера протяженного объекта, наличие которого ограничивает возможность выполнения полета БВС, рассмотрим моделирование воздушной линии электропередач (далее – ЛЭП). На Рисунке 2.10 приведен пример трехмерного моделирования ЛЭП: слева – высокоточная модель отрезка ЛЭП с детальным моделированием элементов опор и проводов, в центре – менее детальная модель, справа – упрощенная. Каждый из рассмотренных вариантов может быть использован для моделирования ограничения в задаче нахождения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения. В качестве примера описания геоинформационной модели ограничения в воздушном пространстве по причине наличия наземного протяженного материального объекта – ЛЭП (как на Рисунке 2.11 справа), предложена формула (2.23):

$$Z_{n_i} = \Phi \{ \text{Бз} [s, d, P_1(X_1, Y_1, H_1), P_2(X_2, Y_2, H_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, H_n), H_h], [\infty], [A_i^{\text{назв}}] \} \quad (2.23)$$

где  $s$  – ширина самой широкой опоры ЛЭП,

$d$  – буферная зона направлена в обе стороны от центральной линии пространственного объекта,

$H_h$  – нижняя граница модели объекта, равная высоте земной поверхности,

$A_i^{\text{назв}}$  – параметр, обозначающий ограничение по причине наличия материального объекта.

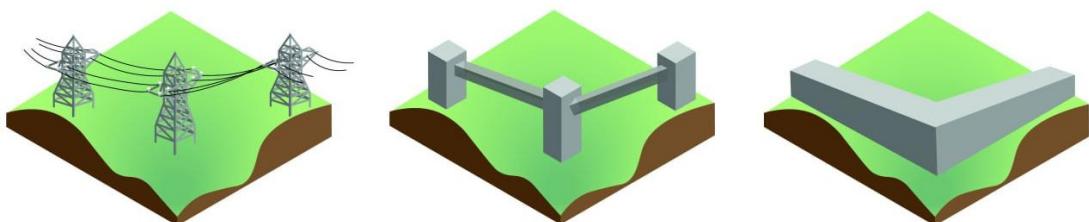


Рисунок 2.11 – Примеры изображений трехмерной модели ЛЭП

В качестве примера площадного объекта, наличие которого ограничивает возможность выполнения полета БВС, рассмотрим здание в населенном пункте. На Рисунке 2.12 представлен пример трехмерной модели здания: слева – высокодетальная модель с детальным моделированием элементов фасада, балконов, антенн на крыше, в центре – модель с меньшим количеством деталей, справа – упрощенная модель. Упрощенная модель здания на Рисунке 2.12 представляет собой полигон-многоугольник, для описания которого предлагается формула (2.24):

$$Z_i = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1, H_1), P_2(X_2, Y_2, H_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, H_n), H_h], [\infty], [A_i^{\text{назв}}] \}, \quad (2.24)$$

где  $H_h$  – нижняя граница модели объекта, равная высоте земной поверхности,

$A_i^{\text{назв}}$  – параметр, обозначающий ограничение по причине наличия материального объекта.

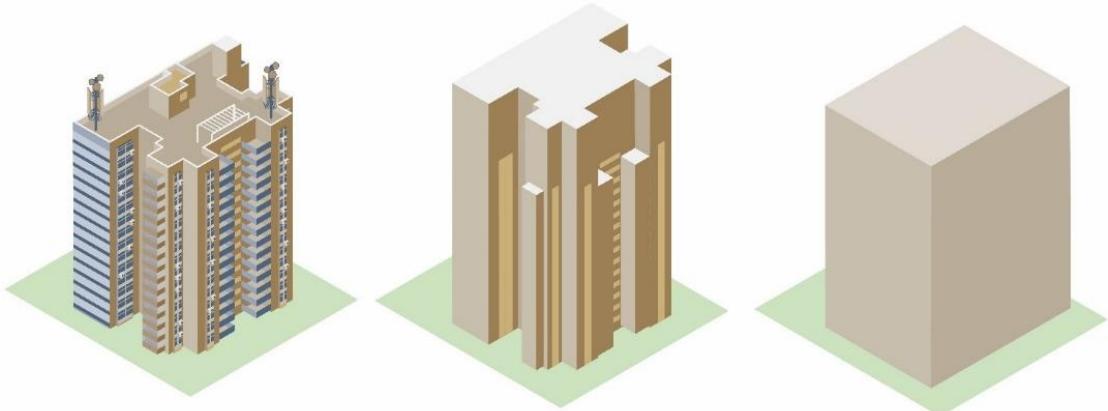


Рисунок 2.12 – Пример трехмерных моделей здания

Таким образом, на основе совокупности моделей наземных ограничений для полетов БВС и цифровой модели рельефа средствами ГИС может быть построена модель нижней границы воздушного пространства для полетов БВС. Уровень генерализации моделей наземных ограничений и, соответственно, модели нижней

границы воздушного пространства должен обеспечивать достаточную точность при планировании полета БВС.

Сочетание цифровой модели рельефа и геоинформационных моделей наземных материальных объектов, препятствующих полету БВС, позволяет сформировать поверхность, ограничивающую минимальную высоту полета, как показано на Рисунке 2.13.



**Рисунок 2.13 – Пример геообраза модели поверхности, ограничивающей минимальную высоту полета БВС.**

## **2.6 Геоинформационное моделирование допустимой зоны перемещения беспилотного воздушного судна**

При планировании полета обработка информации о различных видах ограничений в воздушном пространстве вручную может привести к значительным времененным затратам, которые можно снизить с применением геоинформационных технологий. Геоинформационные технологии являются средством получения и использования пространственных данных об объектах исследования. Вследствие наличия разрешений на полет в пределах ограничивающих элементов, необходимости соблюдения интервалов эшелонирования в воздушном пространстве классов А и С, а также эксплуатационных ограничений типа

или единичного экземпляра БВС, модель пространства, доступного для планирования полета, приобретает индивидуальный характер.

Полеты БВС из точки старта в точку назначения, выполняемые не по правилам визуальных полетов, выполняются с установлением местного или временного режима. Выполнение полета БВС на большие расстояния в пределах прямой видимости внешнего пилота невозможно. При моделировании пространства, доступного для планирования полета конкретного БВС, следует учитывать актуальные ограничения. Таким образом, формула, описывающая воздушное пространство, в котором возможно моделировать оптимальный маршрут полета конкретного БВС из точки вылета в точку посадки, выглядит следующим образом (2.25):

$$B\Pi_j = B\Pi - (Z - Z_{искл}) - Z_m - Z_n \quad (2.25)$$

Кроме того, пользователь воздушного пространства, планирующий полет БВС, имеет право добавить дополнительные ограничения в формулу (2.25).

## **Выводы по второй главе**

Определение допустимой зоны перемещения БВС в воздушном пространстве является одной из задач, которую необходимо решить для вычисления оптимального маршрута БВС. Геоинформационные модели ограничений в воздушном пространстве, рассмотренные в настоящей главе, целесообразно описать в качестве производных (составных) геоинформационных единиц с применением географических образов в виде трехмерных графических (стереометрических) элементов и формул, которые необходимы для систематизации пространственно-временных и атрибутивных параметров ограничений. Для описания данных моделей в среде ГИС разработана система

параметров, изложенная в Таблице 2.1. Данные ограничения локализованы в границах, описанных с применением пар координат, высоты, интервалов времени. В среде полнофункциональной ГИС данные ограничения реализуются в виде совокупности слоев. Формализованное описание пространственных сущностей различных типов ограничений способствует систематизации знаний и формированию соответствующей онтологии в области геоинформационного моделирования воздушного пространства для решения тематических задач. В настоящей работе формализация используется как познавательный прием для изучения ограничений в воздушном пространстве, значимых для полетов БВС. Формализованное описание является средством передачи информации на формальном уровне общения и способствует преодолению пользователем информационного барьера представления об ограничениях в воздушном пространстве для полета БВС.

Определение допустимой зоны перемещения БВС в воздушном пространстве является одним из этапов реализации методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения.

Полученные модельные описания позволяют перейти к разработке методического аппарата рисковой БВС-активности.

### **3 ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Описание и оценка возможных воздействий на процесс перемещения материального тела является одной из фундаментальных научных задач [88]. В таком анализе необходимо обеспечить неизбыточность и целостность [88]. В условиях, когда описана геоинформационная модель пространства, доступного для выполнения полетов БВС, следует разработать и использовать подход к учету, оценке и моделированию различных пространственно-временных аспектов, значимых для пилотирования БВС и вычисления оптимального маршрута полета из точки старта в точку назначения. Формирование критериев оценки воздушного пространства для планирования полета БВС является сложной задачей. Следует учитывать, что у пользователей воздушного пространства, планирующих полет БВС, критерии оптимальности маршрута могут различаться.

Основой для уменьшения сложности вычислений является оптимизация параметров [26]. Объекты изучения, локализованные в определенных границах с привязкой к интервалу времени, отличаются повышенной сложностью при разработке оптимальных решений [138]. С учетом необходимости оценки множества факторов, значимых для вычисления оптимального маршрута полета из точки старта в точку назначения [61], а также возможной субъективности их восприятия, следует выбрать такой подход для оценки указанных факторов, чтобы по итогам его применения можно было получить адекватную оценку информационных единиц геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента по степени приемлемости выполнения полета. Для реализации данного подхода следует применять инструменты геоинформационного анализа, реализованные на базе полнофункциональных геоинформационных систем,

поскольку специализированные ГИС для решения указанной задачи не разработаны.

Анализ состояния воздушного пространства или его сегмента требует, чтобы в модели учитывалась ситуационная составляющая. Геоинформатика изучает пространственные ситуации [95], поэтому геоинформационное моделирование воздушного пространства или его сегмента подразумевает создание ситуационной модели, что важно для решения задач, связанных с перемещением объектов. Подход к оценке воздушного пространства на предмет приемлемости может базироваться на оценке рисков применения БВС, поскольку одним из значимых критериев для определения оптимальности полета БВС является безопасность. Уровень риска во время перемещения по маршруту из точки старта в точку назначения должен быть приемлемым или допустимым для пользователя воздушного пространства, планирующего полет конкретного БВС.

Многообразие типов (моделей) и единичных экземпляров БАС, разнообразие производственных процессов эксплуатантов данного типа авиационной техники, субъективность восприятия и оценки информации о факторах опасности, отсутствие специализированных методик оценки рисков в области применения и эксплуатации БАС объективно свидетельствует о высоком уровне информационной неопределенности, что затрудняет технологическое управление производственной деятельностью эксплуатанта и препятствует применению онтологического подхода, обобщающего опыт управления в сфере применения данного вида транспорта. Устранение неопределенности является предварительным этапом построения онтологий, использование которых позволяет говорить об «онтологическом управлении» [38], которое необходимо для эффективного принятия решений.

### 3.1 Оценка и управление рисками в гражданской авиации

Непосредственно использовать в гражданской авиации опыт управления рисками, имеющийся в других производствах, крайне затруднительно [28]. В авиационной отрасли в настоящее время не сформирован универсальный подход к управлению рисками для безопасности полетов [66]. Методики для оценки рисков применения беспилотных воздушных судов гражданской авиации компаниями-эксплуатантами не разработаны. Соответственно, специализированное программное обеспечение для оценки рисков выполнения полетов различных типов БВС с учетом ситуационной составляющей также не разработано [60, 63]. В процессе оценки рисков возможно учесть множество факторов, значимых для планирования полета. В организации полетов, в процессе выявления и оценки рисков выполнения конкретного полетного задания невозможно игнорировать необходимость анализа пространственно-временной составляющей. Учет различных аспектов ситуационной составляющей следует рассматривать как основу для оценки рисков выполнения полета. Вместе с тем воздушное пространство является сложным объектом для риск-ориентированного моделирования, поэтому информация обо всех рисках для полетов БВС принципиально не может быть полностью формализована. Соответственно, в модели необходимо учесть только те аспекты, которые необходимы для оценки рисков применения определенного типа (модели) или единичного экземпляра БВС с позиции конкретного эксплуатанта.

Оценка рисков является одной из значимых составляющих деятельности в области управления транспортом. В настоящей работе используется определение, принятое в документах Международной ассоциации гражданской авиации [118]: факторы риска для безопасности полетов – комбинация прогнозируемой вероятности и серьезности последствий или результатов реализации опасных факторов.

Подход к оценке приемлемости воздушного пространства на основе оценки рисков соответствует классическому подходу к принятию решений [139], согласно которому, если информация точна и описывается вероятностной мерой, то, как правило, выбирается решение, доставляющее наибольший ожидаемый доход, или решение с минимальным риском [8].

Риск может быть измерен с применением двух основных групп методов: качественных и количественных [16]. Для выполнения операций с данными в геоинформационной модели воздушного пространства целесообразно присвоить факторам рисков или их группам количественные значения. Следует заранее обосновать единицы измерения и диапазон значений параметров. В таком случае риск становится мерой количественного многокомпонентного измерения опасности. В моделировании должна быть учтена изменчивость значения коэффициента фактора риска из-за сезонных или краткосрочных обстоятельств.

Методы оценки рисков, такие, как матрица оценки рисков ИКАО, метод «Контрольный перечень CFIT» (controlled-flight-into-terrain), методика FRAT (Flight Risk Assessment Tools) [94] и другие, используемые в системах управления безопасностью полетов (далее – СУБП) эксплуатантов гражданской пилотируемой авиации, затруднительны к использованию эксплуатантами беспилотных авиационных систем ввиду эксплуатационных особенностей данных транспортных средств [110]. Эксплуатанты, применяющие исключительно БАС, в процессе проектирования СУБП разрабатывают собственные методы оценки рисков применения данной категории авиационной техники, учитывающие организационную структуру предприятия, особенности организации производственного процесса, применяемых типов (моделей) БАС, особенностей выполнения полетных заданий, а также внутренний уровень культуры безопасности полетов. Одной из важнейших задач функционирования СУБП поставщика авиационных услуг является своевременное выявление факторов риска для безопасности полетов, разработка и реализация мероприятий

по их уменьшению. Оценку рисков в соответствии с выявленными факторами и принятой методикой выполняют уполномоченные работники эксплуатанта. Данная деятельность выполняется с целью снижения вероятности негативного авиационного события. Применение в работе простого и надежного инструмента прогнозирования риска и его количественной оценки актуально как для членов экипажа БВС, так и для специалистов в области управления безопасностью полетов [55].

Оценка рисков является комплексным процессом. Для выполнения оценки рисков с применением ГИС необходима интеграция информации из различных источников. Авиационные предприятия, как правило, создают специальные перечни для систематизации информации о работе с факторами опасности. Обязательными составляющими таких перечней являются оценка риска, перечисление мероприятий по его коррекции, оценка эффективности данных мероприятий [67]. При оценке рисков следует руководствоваться тем, что факторы внешней среды оказывают влияние на полет БВС, однако пилотирование БВС, в свою очередь, порождает широкий спектр источников опасности [111] для процессов и объектов в воздушном пространстве и на земле (на воде).

В авиационной деятельности традиционно выделяют основные группы факторов риска: «Человек», «Машина» и «Среда» [66]. Группу факторов «Среда» целесообразно разбить на две подгруппы: «воздушное пространство» и «наземная (надводная) обстановка». К подгруппе «воздушное пространство» следует отнести риски, связанные с перемещением воздушных судов и деятельностью в воздушном пространстве, орнитологической обстановкой, погодными условиями, климатом и другими факторами. В подгруппу факторов «наземная (надводная) обстановка» целесообразно включить рельеф, растительность, ледовую обстановку, жилую и нежилую застройку территории, наличие искусственных сооружений и промышленных объектов различных классов опасности, различные виды дорог с оценкой интенсивности движения, границы

особо охраняемых природных территорий, запланированные мероприятия и другие факторы. Изучение и анализ ситуационной составляющей (обстановки и предполагаемых событий во время полета) в соответствующем сегменте воздушного пространства и на территории (акватории) с учетом предполагаемого времени старта и продолжительности выполнения полетного задания является обязательным компонентом планирования работ с применением БАС. Необходимым компонентом ситуационной составляющей являются модели геопространственных мероприятий [86], основанные на внесении информации о местоположении и времени. Модель геопространственного мероприятия в среде ГИС может быть выражена с применением трехмерной геометрической (стереометрической) фигуры, пример на Рисунке 3.1. Формализованное представление моделей геопространственных мероприятий необходимо для оценки, изучения и анализа пространственно-временной ситуации.

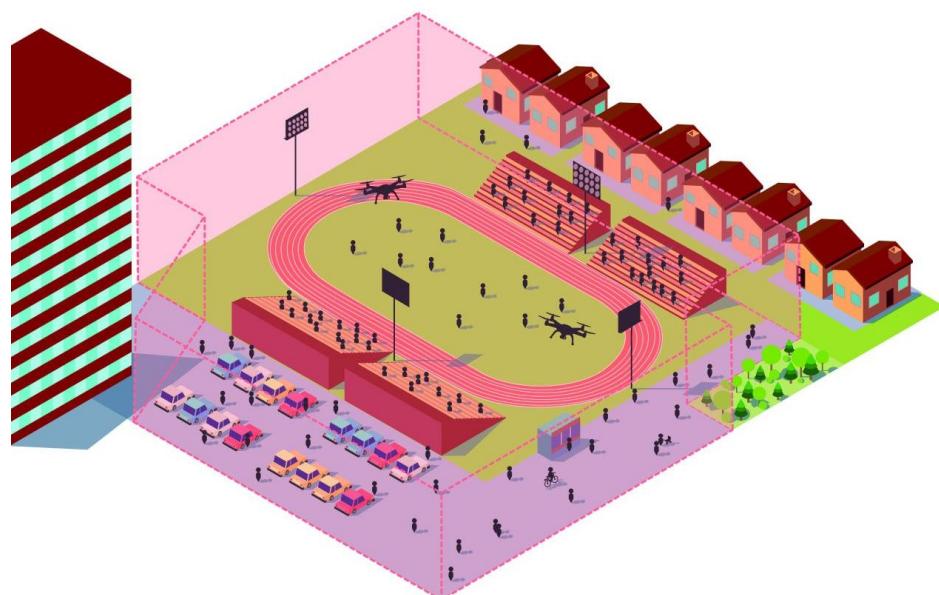


Рисунок 3.1 – Пример модели геопространственного мероприятия

Для описания модели геопространственного мероприятия, изображенного на Рисунке 3.1, следует предложить формулу (3.1):

$$\text{МП}_p = \Phi \left\{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_b - H_h)], [D_i, Pt_i^{\text{наз}}, Pt_i^{\text{прод}}], [A_p^{\text{назв}}] \right\}, \quad (3.1)$$

где  $M\P_p$  – р-е геопространственное мероприятие,

$A_p^{\text{назв}}$  – уникальное название мероприятия,

а остальные параметры соответствуют Таблице 2.1.

Подобные геоинформационные модели предназначены для внесения информации о событиях в границах сегмента воздушного пространства.

После анализа указанной информации становится возможным выполнить оценку различных типов (моделей) или единичных экземпляров БАС, имеющихся в распоряжении эксплуатанта, на предмет пригодности к выполнению полетного задания. При выборе следует учитывать способ производства авиационной техники, степень износа БАС и ее компонентов, способы взлета и посадки БВС, тип и количество двигателей БВС, техническую дальность и продолжительность полета, максимальную скорость и максимальную взлетную массу транспортного средства, их индивидуальные особенности и другие факторы. Таким образом выполняется оценка группы факторов риска «Машина».

Группа факторов риска «Экипаж» связана с назначением внешних пилотов БАС. Неправильная эксплуатация человеко-машинной системы, состоящей из БВС и его экипажа, может привести к негативным последствиям. В свою очередь, адекватная своевременная реакция на опасность членов экипажа увеличивает шансы избежать негативного авиационного события или снизить ущерб от авиационного происшествия. При оценке факторов риска, связанных с назначением экипажа, следует учитывать стаж работы внешних пилотов в области применения и эксплуатации БАС, опыт практического использования типа (модели) или единичного экземпляра БАС, применяемого на конкретном полетном задании, уровень квалификации работников, состояние здоровья, условия пребывания на стартово-посадочной площадке и задании, а также другие факторы.

Вышеперечисленные факторы риска и их группы взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга. Систематизированная информация о классификации факторов риска для полетов БВС предложена на Рисунке 3.2.

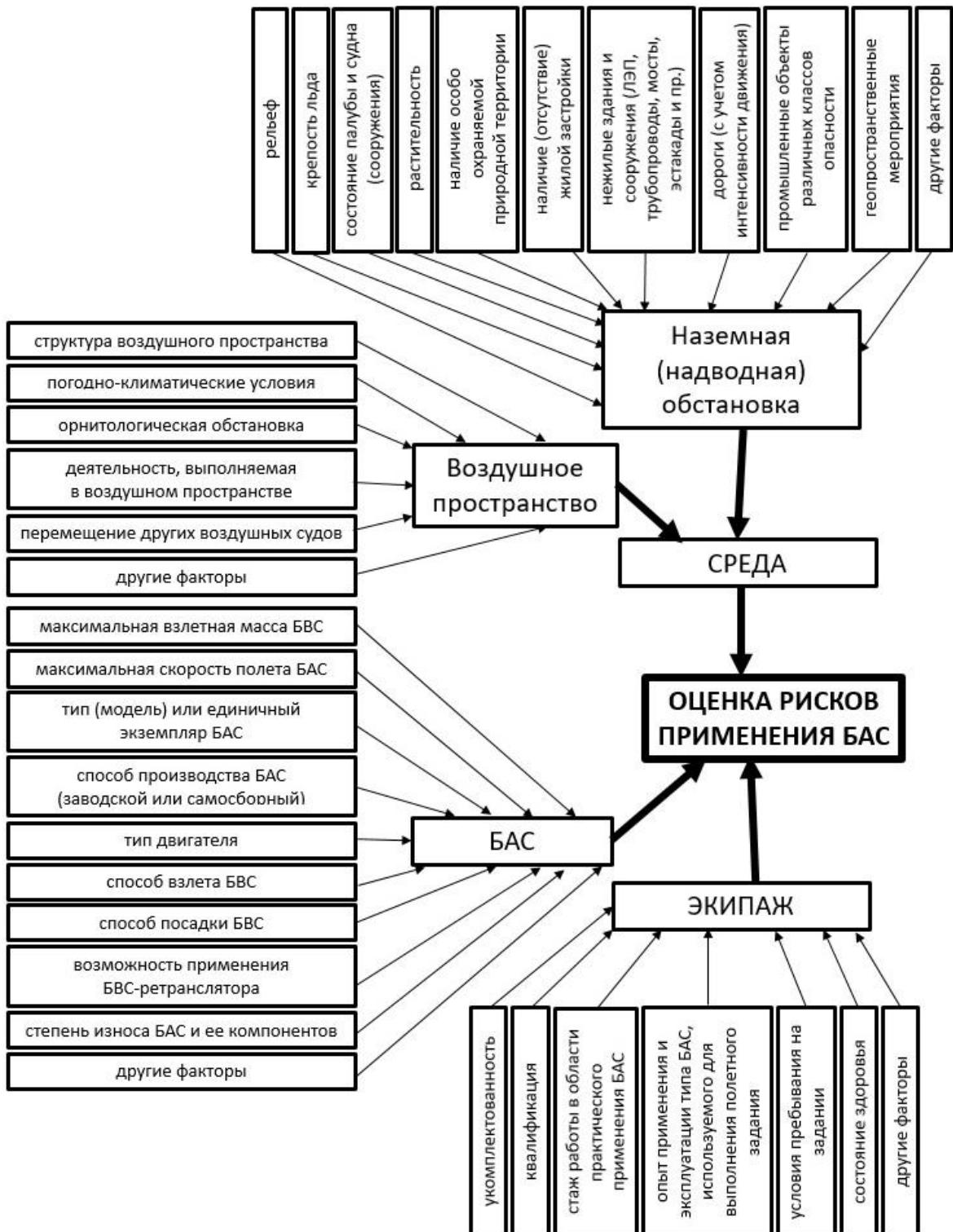


Рисунок 3.2 – Пример классификации факторов для оценки рисков применения БАС

Рисунок 3.3 иллюстрирует влияние групп факторов риска друг на друга при оценке выполнения полетного задания. Ниже приведена пример выполнения расчетов.



Рисунок 3.3 – Схема влияния основных аспектов оценки рисков выполнения полетного задания

По целому ряду причин, в том числе из-за географических особенностей региона выполнения полетов, особенностей выполняемых полетных заданий, различий применяемых типов (моделей) БАС, оценка рисков у эксплуатантов имеет индивидуальный характер. Кроме того, специалисты эксплуатационного и руководящего персонала при оценке рисков по объективным причинам имеют различные знания и опыт, а также могут иметь некоторую субъективность суждений, в том числе из-за разного личного профессионального опыта. С течением времени может потребоваться пересмотр результатов оценки рисков по различным причинам: изменение уровня квалификации руководящего и эксплуатационного персонала, изменение характера негативных авиационных событий (авиационных инцидентов и происшествий), ввод в эксплуатацию новых типов (моделей) БАС и пр.

### **3.2. Геоинформационный подход к оценке рисков выполнения полета беспилотного воздушного судна**

Результаты успешного применения геоинформационных систем для оценки рисков, связанных с применением и эксплуатацией различных видов транспорта, опубликованы в работах российских [1, 12, 42, 43] и зарубежных [126, 127, 132, 133, 136] исследователей. Геоинформационные методы оценки рисков согласуются с целями транспортных организаций и способствуют обеспечению безопасности [16]. Использование геоинформационных систем для анализа пространственно-временного распределения факторов риска применения беспилотных авиационных систем представляется закономерным и целесообразным. Для создания пространственно-временной риск-ориентированной модели воздушного пространства или его сегмента необходимо внести в ГИС информацию о факторах внешней среды, оказывающих влияние на безопасность полетов, структурированной в тематический набор слоев. В данной модели ячейкам пространства в момент времени присваивается значение коэффициента риска.

Поскольку полет БВС выполняется в трехмерном пространстве, целесообразно вычислять значения риска в трехмерных ячейках модели. Совокупность равномерно распределенных таких ячеек образует дискретную трехмерную модель пространства. В зарубежной литературе для описания данных моделей употребляется термин Discrete Global Grid Systems (DGGS) [123]. Дискретные трехмерные модели пространства признаны основой для создания ГИС следующего поколения [123].

Размер ячейки геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента может быть установлен пользователем в соответствии с решаемыми задачами, спецификой полетного задания и особенностями оценки рисков выполнения полетов воздушного судна. Поскольку в настоящей работе

моделирование воздушного пространства выполняется с целью вычисления оптимального маршрута полета БВС, следует выбрать размер ячейки моделирования, руководствуясь требованиями к подготовке документов, необходимых для подачи в органы ЕС ОрВД. Кроме того, для упрощения процессов моделирования следует дискретизировать ось времени на равные интервалы. На основе анализа нормативных документов Российской Федерации [82] и личного профессионального опыта автора в части, касающейся подготовки планов полетов и представлений на установление местного или временного режима, следует предложить размер ячейки моделирования (Таблица 3.1):

Таблица 3.1. – Минимальный размер ячейки риск-ориентированного геоинформационного моделирования воздушного пространства

Название	Обозначение	Размер
Географическая широта	x	1"
Географическая долгота	y	1"
Высота	z	10 м
Время	t	1 минута

Таким образом, ячейка воздушного пространства с заданными размерами (в данном случае, в соответствии с Таблицей 3.1), является информационной единицей риск-ориентированной геоинформационной модели воздушного пространства. В свою очередь, совокупность таких информационных единиц образует дискретную четырехмерную сеть. В целях упрощения оценки риска в среде ГИС для отображения пространственного распределения возможно использовать точки, соответствующие центроидам трехмерных ячеек модели воздушного пространства.

Для определения наличия (отсутствия) возможности выполнения полетного задания следует выполнить анализ распределения значений риска в воздушном пространстве согласно предложенной формуле (3.2):

$$I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{\text{ЭК}}[\Phi_{\text{бвс}}(R_{\text{вп}} \& R_{\text{та}})] \quad (3.2)$$

где  $I_{(x,y,z,t)}$  — ячейка пространства по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  в момент времени  $t$ ,  $R_{\text{вп}}$  — переменная для обозначения совокупности рисков в анализируемом воздушном пространстве или его сегменте,

$R_{\text{та}}$  — переменная для обозначения совокупности рисков на территории или акватории,

$\Phi_{\text{бвс}}$  — функция для оценки соответствия ситуационных рисков для применяемого типа (модели) или единичного экземпляра БАС,

$\Phi_{\text{ЭК}}$  — функция для учета оценки способности экипажа БАС к выполнению целесообразных действий в условиях возможных рисков [63].

Данная формула (3.2) описывает процесс, проиллюстрированный Рисунком 3.3. В авиационной отрасли, как правило, используются три основные категории для классификации значений оценок рисков: неприемлемо, допустимо, приемлемо. На основе полученных полей пространственно-временного распределения значений риска возможно выполнить зонирование по степени приемлемости выполнения полета сегмента воздушного пространства (Рисунок 3.4).

Как в отношении ячеек модели, так и в отношении вычисляемого оптимального маршрута пользователь вправе установить пороговые значения. Принимая во внимание результаты оценки рисков выполнения полета, пользователь модели может внести изменения в параметры полетного задания, в том числе предложить другой состав экипажа или иную БАС, а затем повторить оценку рисков. Реализацию данной процедуры в ГИС-среде следует описать формулой (3.3):

$$R_j = \sum_{i=1}^n I_{(x,y,z,t)} \quad (3.3)$$

где  $R_j$  — оценка рисков  $j$ -го полетного задания.

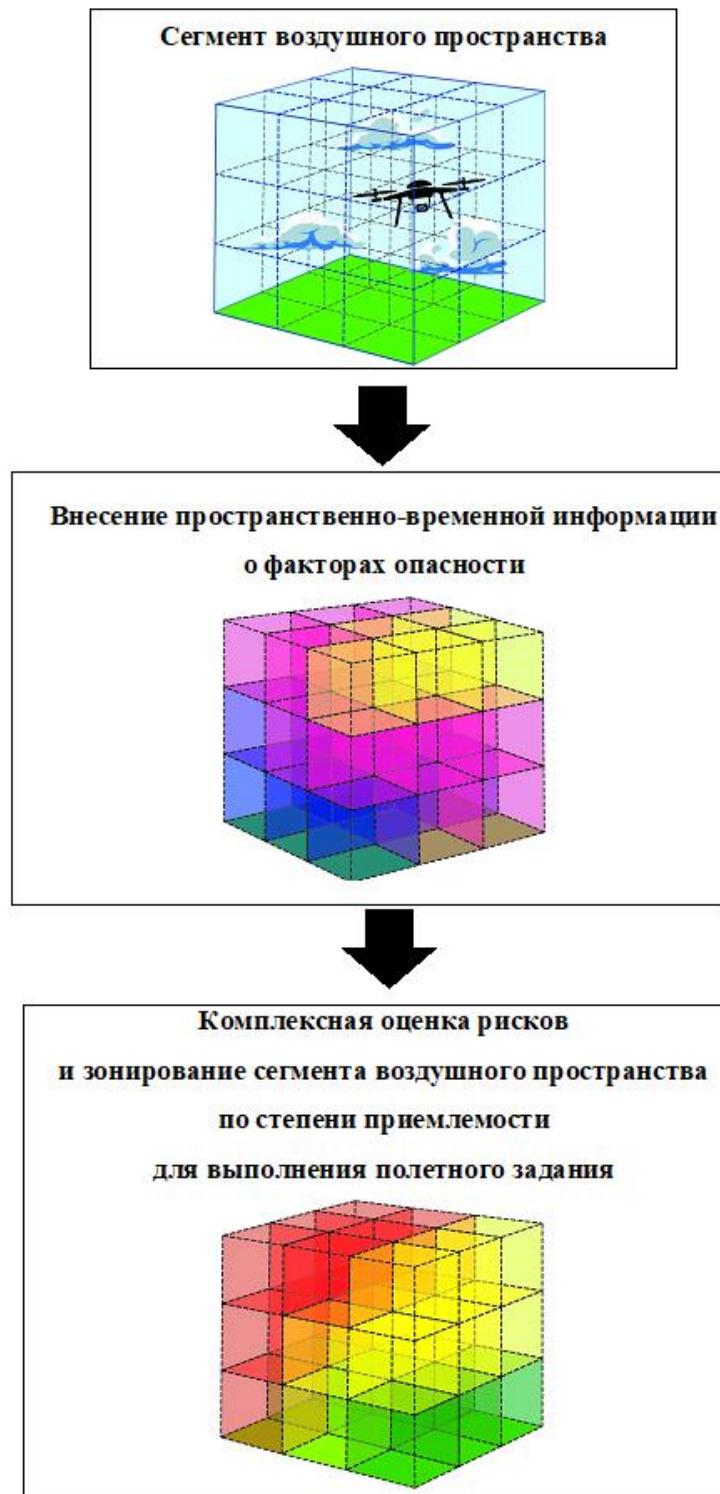


Рисунок 3.4 – Оценка рисков в районе планируемого полета в момент времени

В целях разъяснения выполнения расчетов рассмотрим применение методики на примере деятельности гипотетического эксплуатанта «W». Для оценки рисков применения БАС на предприятии создана комиссия, членами

которой являются наиболее компетентные работники и руководители в области организации и практического применения используемых типов (моделей) и единичных экземпляров БАС. Риски оцениваются с учетом накопленного опыта выполнения работ с применением БАС на предприятии, статистики отказов техники, предоставленной разработчиком, информации о расследованиях авиационных инцидентов и происшествий с участием беспилотной авиационной техники, и другой информации на усмотрение эксплуатанта и членов комиссии. На Рисунке 3.5 приведен пример матрицы оценки рисков, используемой на предприятии. Серьезность последствий и прогнозируемая вероятность факторов опасности измеряется в диапазоне от 1 до 5 баллов, а их произведение является значением фактора риска для безопасности полета БВС. Цветовые обозначения используются для наглядного отображения степени приемлемости риска.

Вероятность	Серьезность последствий				
	Катастрофическая (5 баллов)	Тяжелая (4 балла)	Значительная (3 балла)	Незначительная (2 балла)	Ничтожная (1 балл)
Очень высокая (5 баллов)	25	20	15	10	5
Высокая (4 балла)	20	16	12	8	4
Средняя (3 балла)	15	12	9	6	3
Низкая (2 балла)	10	8	6	4	2
Очень низкая (1 балл)	5	4	3	2	1

#### Условные обозначения

- недопустимый риск
- допустимый риск
- приемлемый риск

Рисунок 3.5 – Матрица оценки рисков гипотетического эксплуатанта «W»

Рассмотрим практическую ситуацию из деятельности эксплуатанта «W», в которой J-му БВС необходимо выполнить полет из точки старта в точку назначения. Данное воздушное судно выполняет полеты более 1 года из 5 запланированных, отказов БВС за время эксплуатации на предприятии

не зафиксировано, максимальная взлетная масса – 7 кг. Экипаж J-го БВС состоит из двух внешних пилотов, работники имеют стаж работы в области практического применения беспилотных авиационных систем 2 года, опыт применения заявленного типа (модели) БВС 1 год. Внешние пилоты обучены применению данного типа БВС на предприятии-изготовителе. Запланированный полет выполняется над территорией стадиона на высоте 70 м от земной поверхности, прогнозируемые погодные условия соответствуют эксплуатационным ограничениям заявленного вида техники. Сценарий возможного авиационного события – падение J-го БВС на стадион. Оценка рисков выполняется согласно формуле (3.3). Из-за относительно непродолжительного периода эксплуатации и отсутствия отказов J-го БВС, а также погодных условий, соответствующих техническим характеристикам БВС переменной  $\Phi_{бвс}$  присвоено низкое значение 1,2. По причине небольшого опыта внешних пилотов значение  $\Phi_{эк}$  составляет 1,6. Если полет выполняется в условиях отсутствия людей на стадионе, например, в 05.30 местного времени (Рисунок 3.6), вероятность негативного авиационного события составляет 2 балла, серьезность последствий – 3 балла.

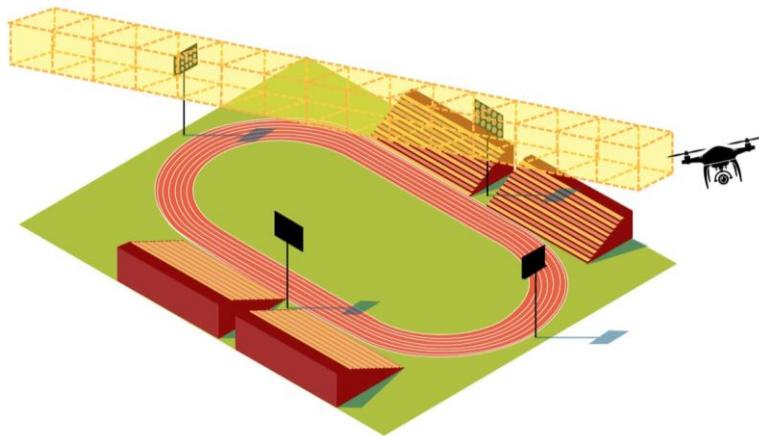


Рисунок 3.6 – Оценка рисков выполнения полета БВС

Таким образом,  $R_{вп} \& R_{ta} = 6$  баллов, риск оценивается согласно формуле (1)  $I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{эк}[\Phi_{бвс}(R_{вп}\& R_{ta})] = 1,6*1,2*6 = 11,52$  баллов. Согласно матрице оценки рисков, итоговое значение  $I_{(x,y,z,t)} = 11,52$  относится к категории допустимого риска. Если полет БВС по тому же маршруту запланирован в период проведения на

стадионе массового мероприятия (Рисунок 3.7), серьезность последствий падения J-го БВС оценивается в 4 балла. В данном случае  $R_{\text{вп}} \& R_{\text{та}}$  оценивается в 8 баллов, а риск для полета БВС неприемлемый, поскольку  $I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{\text{эк}}[\Phi_{\text{бвс}}(R_{\text{вп}} \& R_{\text{та}})] = 1,6 * 1,2 * 8 = 15,36$  баллов.

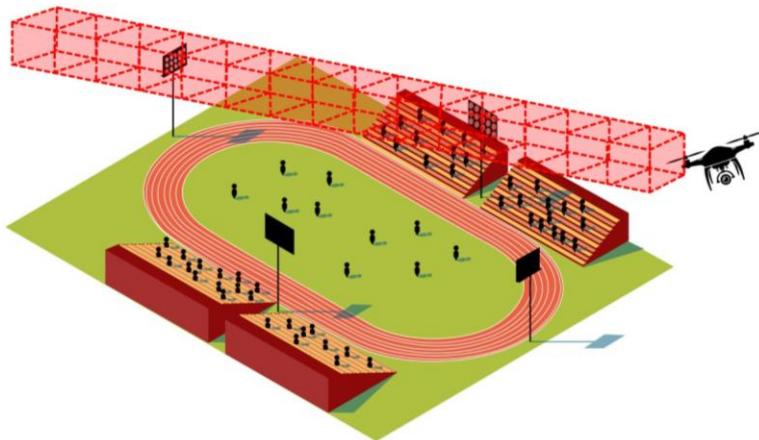


Рисунок 3.7 – Оценка риска выполнения полета БВС во время массового мероприятия

В данном случае во избежание выполнения полета в условиях повышенного риска негативного авиационного события целесообразно рассмотреть возможность выполнения полета по другому маршруту, сделать выбор в пользу другого БВС или внешних пилотов, обладающих большим опытом, а затем выполнить повторную оценку рисков выполнения полетного задания.

### **Выводы по третьей главе**

Геоинформационные системы являются эффективным инструментом решения пространственных задач в области риск-ориентированного моделирования. В среде ГИС возможно выполнять выявление, учет и анализ пространственно-временной и атрибутивной информации об объектах и явлениях, значимых для безопасности полетов, применять методики интегральной оценки

факторов риска, оценивать участки воздушного пространства по степени риска, зонировать по степени приемлемости для пилотирования БВС. Корректная риск-ориентированная геоинформационная модель воздушного пространства или его сегмента необходима для поддержания ситуационной осведомленности эксплуатационного и руководящего персонала, поддержки принятия управлеченческих решений. В данной модели воздушное пространство представлено с учетом точки зрения поставщика авиационных услуг с применением БВС на факторы риска, значимые для полета. Применение ГИС позволяет учесть разнотипную пространственно-временную информацию.

В рамках подготовки настоящей главы диссертации выполнен учет факторов, оказывающих влияние на безопасность полетов БВС, и их систематизация в соответствии с основными категориями, традиционно используемыми в системах управления безопасностью полетов поставщиков авиационных услуг. Данная классификация лежит в основе подхода к построению геоинформационной риск-ориентированной модели воздушного пространства. Для построения данной модели эксплуатант БВС в среде полнофункциональной ГИС организует слои пространственно-временных и атрибутивных данных с соответствующим тематическим наполнением, использует инструменты пространственного анализа и их комбинации для выполнения вычислительных операций по оценке рисков в соответствии с используемыми в организации методиками. Оценка рисков применения БАС пользователями воздушного пространства имеет индивидуальный характер в силу различий в методиках, в применяемой технике, особенностей выполнения полетных заданий, квалификации персонала и других значимых факторов. Предложенный и обоснованный подход к оценке пространственно-временного распределения рисков для выполнения полетов БВС на основе использования полнофункциональных геоинформационных систем с соответствующим тематическим наполнением является универсальным. Данный подход предполагает декомпозицию сложной задачи по оценке рисков

пилотирования БВС в информационной единице модели воздушного пространства до операционного уровня.

Вычисление оптимального маршрута полета из точки старта в точку назначения предполагает избегание участков, в которых БВС подвергается повышенному риску авиационного инцидента или происшествия. Риск выполнения полетного задания должен быть приемлемым или допустимым. Применение методов оценки рисков полета БВС в воздушном пространстве или его сегменте позволяет учесть и оценить множество значимых факторов, характеризующих ячейку геоинформационной модели, и вывести итоговую количественную оценку, что уменьшает сложность вычислений при выполнении операции по построению оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения. Применение геоинформационных инструментов пространственного анализа для оценки рисков и построения оптимальных маршрутов перемещения БВС повышает качество решения задач по сравнению с методами, в которых данные инструменты не применяются, снижает риск негативных авиационных событий и издержки от выполнения полетов по субоптимальным маршрутам. Систематизация многообразной информации о факторах опасности и создание геоинформационного подхода к анализу полей пространственно-временного распределения риска пилотирования БВС приводит к снижению информационной неопределенности.

Работа с информацией о факторах опасности, их пространственно-временном распределении является необходимым компонентом методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения.

## **4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-СОДЕРЖАТЕЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РИСКОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ БВС-ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Различные взаимосвязанные транспортные системы (автомобильная, железнодорожная, морская, речная, авиационная) образуют гетерогенную транспортную сеть [106]. Представители авиационной и космической промышленности рассматривают БАС в качестве значимых компонентов будущей системы транспорта [35], что делает актуальной разработку методов моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения БВС.

Создание методик построения геоинформационных моделей воздушного пространства для вычисления оптимального маршрута БВС гражданской авиации из точки старта в точку назначения является актуальной задачей. В силу конструкционных и эксплуатационных особенностей различных типов БВС, специфики выполняемых задач, использование программного обеспечения для вычисления маршрутов полетов пилотируемой авиации затруднительно.

В решении практических задач в области управления транспортом непосредственное применение многих математических моделей невозможно по причине отсутствия необходимых пространственных данных [21, 25]. В научной литературе перечислены различные инструменты и алгоритмы построения оптимальных маршрутов перемещения. Применение алгоритмов построения оптимальных маршрутов материальных тел, в частности, транспортных средств, невозможно без наличия модели пространства, в котором происходит перемещение. Таким образом, необходимо предложить геоинформационную модель воздушного пространства или его сегмента, в которой возможно применение инструментов и алгоритмов вычисления оптимального маршрута перемещения БВС, в том числе с установлением местного или временного режима.

Проблемами автоматизированного вычисления маршрута полета БВС в трехмерном пространстве является обоснованность и безопасность моделирования, точность решения и способность к глобальной оптимизации в сложных географических условиях [141]. Дополнительная сложность построения модели воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС заключается в том, что такие объекты, как БВС, не допущенные к выполнению полетов по маршрутам обслуживания воздушного движения и по маршрутам полетов беспилотных воздушных судов, не выполняют перемещение по транспортной сети. Возможности полнофункциональных геоинформационных систем позволяют использовать собственные инструменты построения оптимальных маршрутов перемещения или интегрировать соответствующие скрипты на языке программирования, используемом в ГИС. Для использования многих алгоритмов вычисления оптимальных маршрутов, реализованных в среде полнофункциональных ГИС, необходимы графы пространственных данных. Такие алгоритмы реализованы в том числе в интерфейсе полнофункциональных геоинформационных систем.

#### **4.1 Разработка и обоснование геоинформационной модели сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных**

Графовый анализ как одно из направлений Data Science может быть использован при решении широкого спектра задач: от создания рекомендательных систем до вычисления оптимального маршрута [112]. Задача поиска кратчайшего пути является одной из важнейших задач теории графов [112]. К алгоритмам вычисления оптимальных маршрутов перемещения, использующих граф пространственных данных, относят алгоритмы Дейкстры, Дейкстры-Грибова, Левита, Йена, Белмана-Форда, Джонсона, Степанова, Флойда-Уоршелла, семейство

алгоритмов star ( $A^*$ ,  $T^*$  и другие), волновой алгоритм Ли, БП и другие [98]. Граф представляет собой совокупность отрезков и точек, в которых соединены отрезки. Для описания графа сети применима формула (4.1):

$$G = (V, U), \quad (4.1)$$

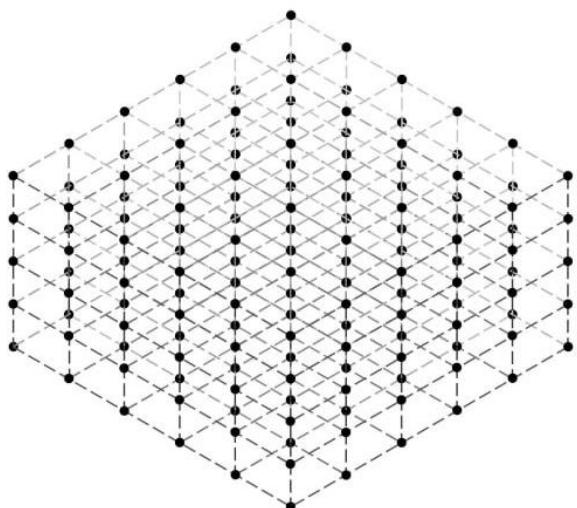
где  $V$  – множество вершин (не может быть пустым),  
 $U$  – множество ребер [64].

Размер информационной единицы геоинформационной модели воздушного пространства или его сегмента может быть установлен пользователем в соответствии с решаемыми задачами, спецификой полетного задания и особенностями выполнения полетов воздушного судна.

В настоящей работе геоинформационное моделирование воздушного пространства или его сегмента выполняется на основе информации, закрепленной в положениях нормативно-правовых актов в области воздушного законодательства. Маршрут планируемого полета беспилотного воздушного судна записывается в соответствующие документы, которые предоставляются в органы ЕС ОрВД. В плане полета, а также представлении на установление местного или временного режима маршрут записывается с указанием географических координат точек и указанием времени начала полета, а также его продолжительности. Поскольку в настоящей работе моделирование воздушного пространства выполняется с целью вычисления оптимального маршрута полета БВС в воздушном пространстве Российской Федерации или его сегменте, следует выбрать размер информационной единицы в пространстве, руководствуясь требованиями к подготовке документов, необходимых для подачи в органы ЕС ОрВД.

Таким образом, модель воздушного пространства или его сегмента, используемую для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС с целью

внесения информации в документы, направляемые в органы ЕС ОрВД, возможно реализовать в виде графа пространственных данных с вершинами, расположенными с интервалом 1" в плоскости и 10 м по высоте. Вершины графа следует соединить горизонтальными и вертикальными отрезками. Поскольку представление на установление местного или временного режима и план полета БВС подается с указанием географических координат, описывающих траекторию перемещения, следует считать, что перемещение в данной модели воздушного пространства или его сегмента, реализованной в виде графа пространственных данных (Рисунок 4.1), является дискретным между узлами сети [22]. Данный трехмерный граф пространственных данных является не ориентированным, так как БВС могут перемещаться в любом направлении. Граф в модели воздушного пространства или его сегмента с заданными параметрами вершин и ребер является конечным, поскольку известны границы воздушного пространства или его сегмента, а также интервалы между вершинами и методы их соединения. Задачу нахождения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения можно свести к задаче вычисления оптимального пути от одной вершины графа к другой, в которой необходимо найти путь с минимальной стоимостью перемещения, удовлетворяющий заданным условиям.



#### Условные обозначения

- вершина графа
- — — ребро графа

Рисунок 4.1 – Образ трехмерного графа пространственных данных, используемый для моделирования воздушного пространства

Поиск оптимального решения поставленной задачи предполагает вычисление оптимумов целевой функции при наличии различных ресурсных ограничений на основе математических методов [112]. Построение оптимизационной модели предполагает задание целевой функции, области допустимых решений и системы ограничений. Основной задачей оптимизационной модели является нахождение экстремума функций в условиях наличия ограничений [29].

В классической теории полезности решение оптимально, если оно имеет наибольшую ожидаемую полезность среди всех возможных решений [8]. Для реализации инструмента построения оптимальных маршрутов полетов БВС из точки старта в точку назначения в среде тематического проекта полнофункциональной ГИС необходимо определить критерии, которым должен соответствовать маршрут. Формирование критериев оптимальности маршрута полета БВС является сложной задачей. Например, при решении логистической задачи перевозки груза от поставщика к потребителю необходимо найти компромисс между временем, стоимостью и надежностью доставки. Во многих научных работах критерием оптимальности маршрута полета БВС названа энергоэффективность. Критерий «энергоэффективность» следует считать сочетанием показателей «стоимость полета» и «затраченное время». Расход топлива или заряда аккумуляторной батареи на выполнение полета из точки старта в точку назначения указывает на экономическую эффективность построенного маршрута (в контексте стоимости полета и затраченного времени). Тем не менее, это не единственный критерий оптимальности маршрута полета, которым следует руководствоваться.

«Надежность» полета БВС из точки старта в точку назначения в значительной степени синонимична термину «безопасность». Безопасность выполнения полетного задания достигается за счет снижения влияния факторов рисков с целью избежать авиационных инцидентов и происшествий. Исходя из изложенного в главе 3 настоящей работы, оценка рисков применения типа

(модели) или единичного экземпляра БВС у пользователей воздушного пространства индивидуальна. В целях упрощения процедуры оценки рисков выполнения полета БВС описана классификация факторов опасности на три основные группы – «Экипаж», «БАС» и «Среда». «Среда», в свою очередь содержит две подгруппы: «Наземная обстановка» и «Воздушное пространство». Пользователь, планирующий полет БВС, вправе установить пороговые (средние и (или) максимальные) значения в отношении суммы и информационной единицы модели воздушного пространства, используемой для выполнения расчетов. Риск выполнения полета БВС должен быть приемлемым или хотя бы допустимым.

Полет БВС может быть выполнен только в той части воздушного пространства, в которой отсутствуют ограничения для его перемещения [56]. Исходя из изложенного в главе 2 настоящей работы, для моделирования доступного для конкретного полета БВС воздушного пространства из графа следует выбрать и исключить («стереть») участки, соответствующие ограничениям в воздушном пространстве или его сегменте, при этом следует учесть исключения, если таковые предусмотрены. В совокупности ограничений в воздушном пространстве необходимо применить те, которые актуальны для решения конкретной задачи, то есть реализовать принцип селектирования. Полученный график является моделью воздушного пространства, доступного для планирования полета конкретного БВС. Последовательность отрезков графа, в которой начальная вершина отрезка является конечной вершиной соседнего отрезка, образует модель маршрута полета БВС в воздушном пространстве [72]. Отрезки маршрута должны быть определены по географическим координатам и интервалам времени (UTC). Оптимальным следует считать маршрут, который в наибольшей степени удовлетворяет критериям оптимальности, установленным пользователем. Следует учитывать, что у пользователей воздушного пространства, планирующих полет БВС, критерии оптимальности маршрута могут различаться.

Исходя из изложенного, в случае с вычислением оптимального маршрута перемещения из точки старта в точку назначения необходимо найти адекватное соотношение между показателями энергоэффективности и безопасности в доступном для полета БВС воздушном пространстве, отражающее интересы пользователя воздушного пространства. Соответствующая семантическая сеть изображена на Рисунке 4.2. Таким образом, информационным единицам модели воздушного пространства, а именно отрезкам графа пространственных данных необходимо присвоить вес в соответствии с количественными значениями оценки риска, вычисленными согласно методикам пользователя воздушного пространства.

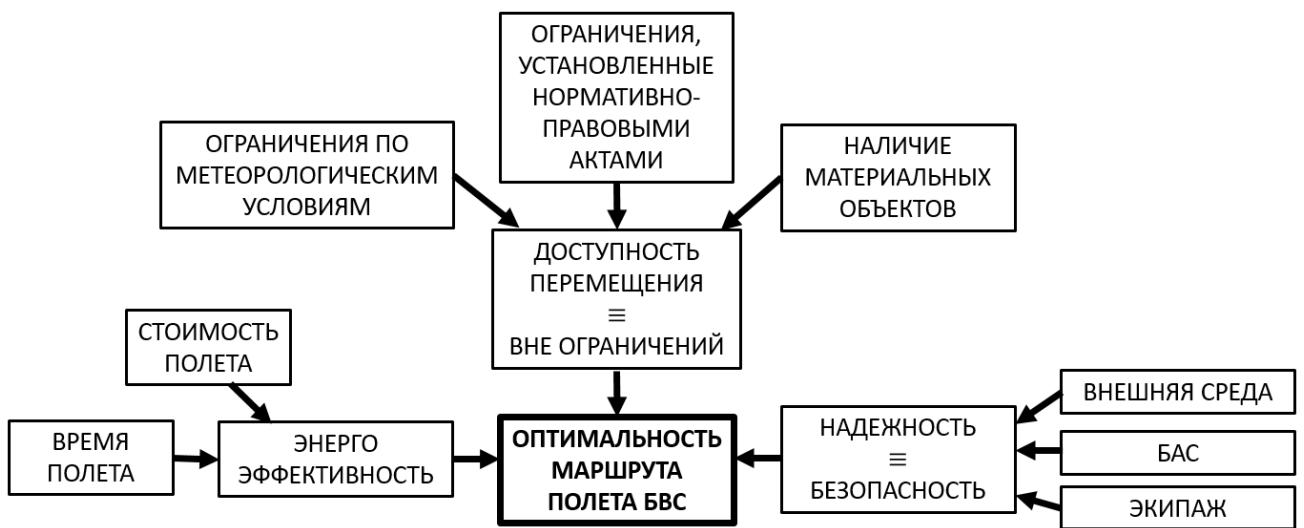


Рисунок 4.2 – Семантическая сеть формирования понятия  
«Оптимальность маршрута полета БВС»

В настоящей работе оптимизация маршрута полета из точки старта в точку назначения выражается в минимальной сумме рисков выполнения полетного задания, при этом полет выполняется вне ограничений в воздушном пространстве, а общая протяженность маршрута не превышает значение технической дальности и продолжительности полета БВС. Сумма рисков выполнения полетного задания является целевой функцией, стремящейся к минимуму, требование к отсутствию превышения протяженности маршрута полета над значением технической дальности и продолжительности полета конкретного БВС – ограничением, а обязательное построение маршрута исключительно в доступном воздушном

пространстве соответствует поиску оптимального решения в пределах области допустимых значений. Следует предложить следующую формулу оптимизации (4.2):

$$\begin{aligned} R_j &\rightarrow \min, \\ S &\leq T\Delta(j), \\ S &\in V\Pi_j \end{aligned} \tag{4.2}$$

где  $R_j$  – оценка рисков полетного задания  $j$ -го БВС, являющаяся функцией оптимизации,

$S$  – маршрут перемещения,

$T\Delta(j)$  – техническая дальность и продолжительность полета  $j$ -го БВС,

$V\Pi_j$  – воздушное пространство, доступное для полета  $j$ -го БВС.

Геоинформационный подход к оценке рисков выполнения полета в информационной единице модели воздушного пространства или его сегмента подробно обоснован в главе 3 настоящей работы. Операция повышения весов отрезков графа в ГИС-среде изображена на Рисунке 4.3. Риск выполнения полета БВС не может быть отрицательным. Сформированный взвешенный граф следует использовать в качестве входных данных для алгоритма построения оптимального маршрута полета БВС. Отрезки графа, у которых весовое значение категорировано как неприемлемое для пользователя, планирующего полет БВС, возможно стереть из графа пространственных данных с целью полностью исключить возможность построения маршрута на данном участке для избежания полета в условиях повышенной вероятности авиационного происшествия или инцидента.

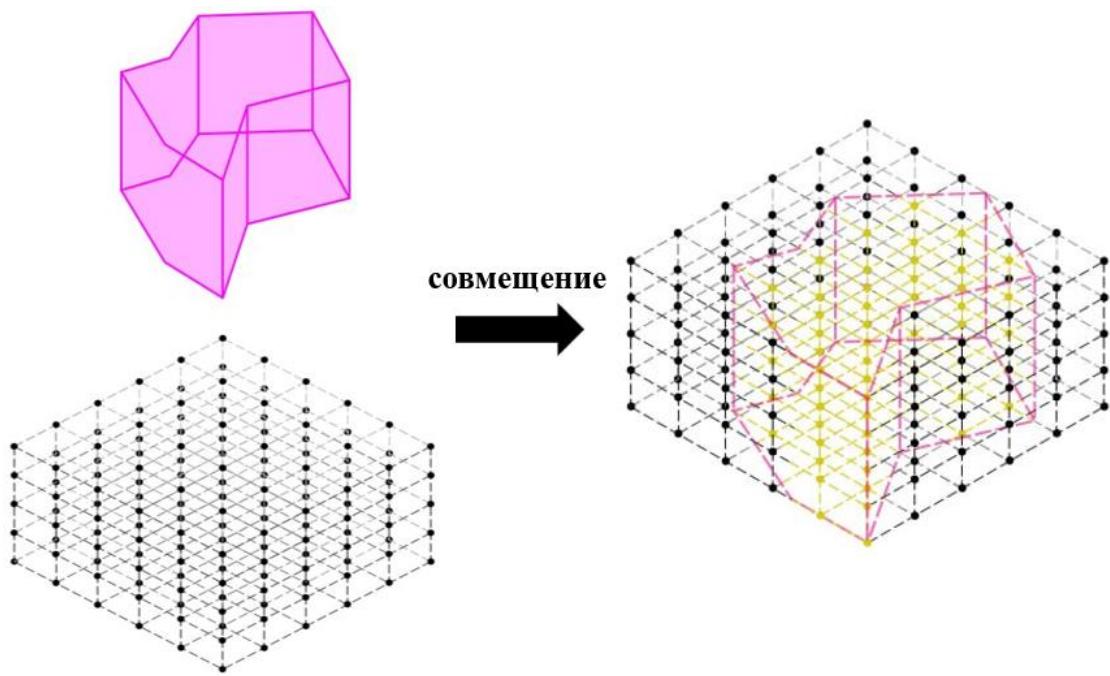
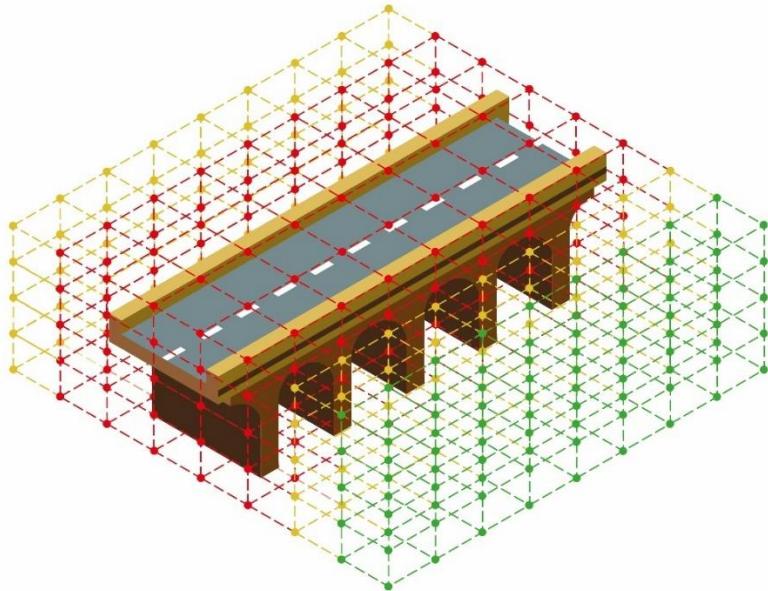


Рисунок 4.3 – Увеличение веса отрезков графа пространственных данных по причине повышенного риска в сегменте воздушного пространства

В целях формирования графа пространственных данных требуется анализ информации об объектах и явлениях, значимых для моделирования полета конкретного БВС. Если наличие объекта явно указывает на невозможность выполнения полета – необходимо исключить из графа соответствующие отрезки и вершины. В ином случае следует изучить влияние объекта на безопасность полета БВС и, соответственно, увеличить или уменьшить вес отрезков графа.

В моделировании может быть учтено комбинированное воздействие некоторых объектов и явлений на возможность выполнения полета конкретного БВС. Рассмотрим соответствующий пример, представленный на Рисунке 4.4. Наличие материального объекта исключает возможность выполнения полета: в месте расположения объекта отрезки графа отсутствуют. Кроме того, в документации производителя данного БВС указано, что полет вблизи железобетонной конструкции подвергается повышенной опасности по причине наличия помех для оборудования, поэтому отрезкам графа, расположенные вблизи данного объекта, следует назначить неприемлемый уровень риска. При этом

для других БВС полет вблизи железобетонной конструкции может не подвергаться повышенной угрозе.



### Условные обозначения

Уровень риска  
для полета БВС:

- приемлемый
- допустимый
- неприемлемый

Рисунок 4.4 – Воздействие материального объекта на выполнение полета  
БВС

В ходе моделирования необходимо предусмотреть, что в рассматриваемый период времени весовое значение отрезка может измениться. В таких случаях следует создать отрезки, совпадающие по пространственному положению, но с разными атрибутами, у которых будет различаться весовое значение, вычисленное на основе риск-ориентированного подхода, а также интервал времени.

При вычислении веса отрезка графа в качестве дополнительного параметра могут быть учтены метеоусловия, в частности направление ветра. Точки в среде ГИС с указанием значений метеоэлементов также являются моделями, содержащими информацию, значимую для вычисления оптимального маршрута полета. Влияние ветра на дальность и продолжительность полета БВС самолетного и мультироторного типов рассмотрено в работе [14]. Если в расчетах направление ветра совпадает с направлением перемещения БВС, то расход топлива или заряда аккумуляторной батареи будет ниже, чем в условиях штиля, соответственно, следует уменьшить вес таких отрезков графа. Наоборот, если ветер направлен навстречу БВС, вес отрезков необходимо увеличить. В случае, когда направление

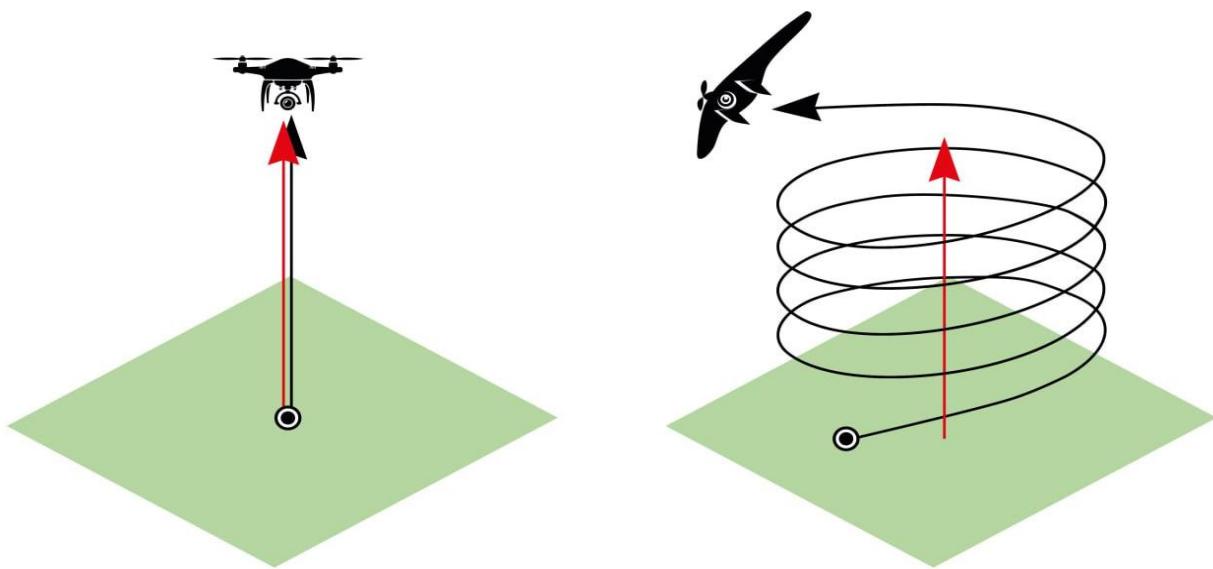
ветра не совпадает с отрезками графа, в целях моделирования допустимо подобрать подходящие пропорциональные коэффициенты, корректирующие вес отрезков. В соответствии с изложенным в подглаве 2.2 настоящей работы участки, в которых прогнозируемые значения метеоэлементов не соответствуют эксплуатационным ограничениям конкретного БВС, исключены из графа.

Следует отметить возможную разницу в восприятии объектов и явлений различными эксплуатантами. Субъективность восприятия обусловлена множеством факторов, что может быть отражено в оценке рисков, как рассмотрено в главе 3 настоящей работы. Кроме того, один и тот же объект может быть по-разному категорирован. В качестве примера следует предложить зоны полетов беспилотных воздушных судов [75]. Если планируется выполнение полета с установлением местного или временного режима по всей предполагаемой траектории перемещения, то данный объект следует учитывать в вычислениях как ограничение для полета. Однако в случае, если предполагается полет не в сегрегированном воздушном пространстве, который не противоречит требованиям воздушного законодательства, зона полетов беспилотных воздушных судов не является ограничением, но перемещения в ней могут быть подвергнуты повышенному риску, поскольку возможные траектории перемещения других БВС неизвестны и непредсказуемы.

Наибольшей полезностью обладает маршрут, который имеет минимальную стоимость по сумме значений в каждой его информационной единице. При этом техническая дальность и продолжительность полета не должна превышать суммарную протяженность маршрута, в противном случае БВС не достигнет точки назначения. Дополнительным условием может стать максимально допустимое значение риска в информационной единице маршрута.

При подаче плана полета, а также представления на установления местного или временного режима, маршрут записывается с указанием географических координат точек и диапазона высоты в десятках метров, а также времени

выполнения полета (UTC). В представлении на установлении местного или временного режима, в плане полета БВС маршрут перемещения может быть указан как полигон, ограниченный координатами, или как буферная зона от линии. Подбор стартово-посадочных площадок выполняется пользователем, планирующим выполнение полетного задания. При этом органам ЕС ОрВД для установления режима и планирования использования воздушного пространства способ набора или снижения высоты БВС не важен, учитывается только описание границ пространства, необходимого для выполнения полета, в том числе взлета и посадки. Рисунок 4.4 иллюстрирует способы взлета и набора высоты БВС: слева – пример БВС с вертикальным способом взлета и, соответственно, посадки, справа – пример набора высоты БВС по спирали. Такой тип набора высоты характерен для БВС самолетного типа, которые выполняют старт либо с использованием катапульты (эластичная или пневматическая), либо непосредственно из рук внешнего пилота без дополнительных приспособлений. Поскольку в плане полета, а также в представлении на установление местного или временного режима, траектория набора высоты по спирали с описанием деталей не указывается, для упрощения вычислений целесообразно обобщить модель траектории взлета по спирали до вертикальной линии, направленной вверх, как показано на Рисунке 4.5 справа.

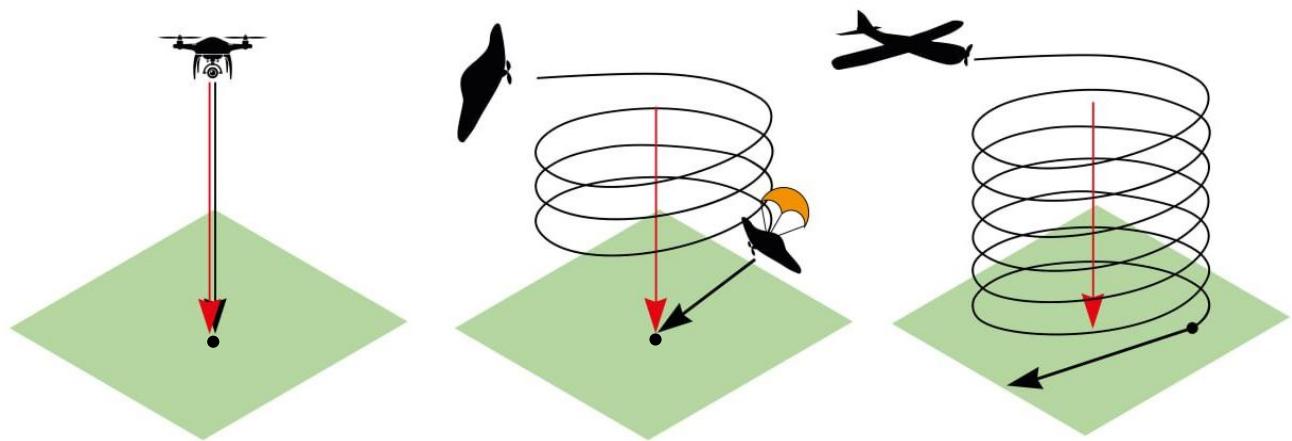


### Условные обозначения

	точка старта		фактическая траектория взлета и набора высоты
	земная поверхность		обобщенная траектория взлета и набора высоты

Рисунок 4.5 – Способы взлета и набора высоты БВС

В свою очередь, способы снижения высоты БВС соответствуют способу набора высоты, поэтому модель траектории снижения высоты по спирали целесообразно обобщить до вертикальной линии, направленной вниз. Процедура посадки БВС в моделировании представляет собой этап снижения высоты до достижения стартово-посадочной площадки, которая может быть расположена на земной поверхности, на ледовом покрытии водного объекта, на поверхности искусственного объекта или сооружения. Посадка может быть выполнена с применением вертикального снижения, на парашюте или по-самолетному (Рисунок 4.6). В целях упрощения вычисления оптимального маршрута модели траектории посадки на парашюте и по-самолетному обобщены до вертикальной линии, направленной вниз, как показано на Рисунке 4.6 в центре и справа.



### Условные обозначения



точка раскрытия  
парашюта



фактическая траектория  
взлета и набора высоты



точка касания  
земной поверхности



обобщенная траектория  
взлета и набора высоты

  земная поверхность

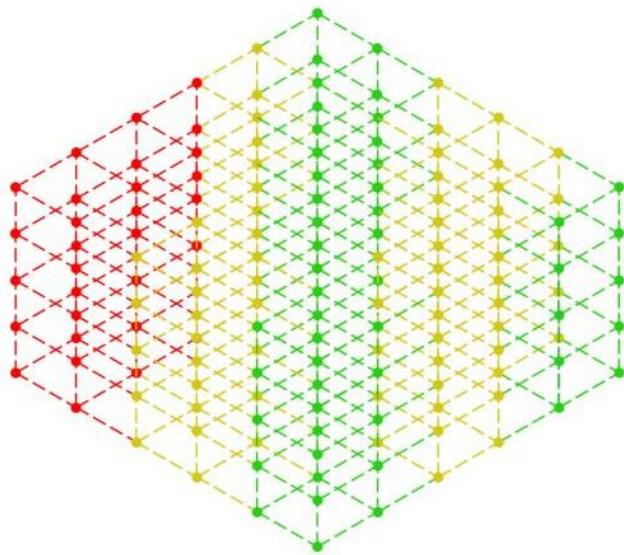
Рисунок 4.6 – Способы посадки БВС

Исходя из изложенного, процедуры взлета, набора и снижения высоты, посадки БВС при использовании геоинформационной модели воздушного пространства целесообразно моделировать как перемещение по вертикальным отрезкам графа. Другие этапы полета по маршруту моделируются как перемещение по горизонтальным отрезкам графа. Исходя из вышеописанных конструктивных и эксплуатационных особенностей существующих типов (моделей) и единичных экземпляров БВС, а также обработки представлений на установление местного или временного режима и планов полета органами ЕС ОрВД, использование наклонных отрезков графа, как предложено в работе [134], в решении задачи по вычислению оптимального маршрута полета БВС в воздушном пространстве РФ нецелесообразно. Следует учитывать, что при обработке плана полета и представления на установление местного или временного режима небольшой размер необходимого для полета БВС пространства (в плоскости и по высоте)

снижает вероятность пересечения с различными категориями ограничений в воздушном пространстве, рассмотренных в главе 2 настоящей работы, что, в свою очередь, может снизить вероятность отказа органов ЕС ОрВД. Поэтому в модели воздушного пространства для вычисления оптимального маршрута перемещения БВС следует назначить вес вертикальных отрезков графа значительно больше, чем горизонтальных. Таким образом, во взвешенном графе перемещение по вертикальным отрезкам становится менее выгодным. При этом, исходя из специфики процессов реального применения и эксплуатации БАС, пользователь может задать условие, при котором набор и снижение высоты для выполнения полета требуется выполнять в непосредственной близости от точки старта с целью осуществления контроля данного процесса экипажем БВС. В случае значительного удаления БВС от наземной станции управления могут возникнуть сложности с контролем и передачей команд для БВС. Подбор стартово-посадочной площадки выполняется таким образом, чтобы получить достаточно пространства для взлета и набора высоты. Для учета указанного обстоятельства в графе, используемом для вычисления оптимального маршрута полета БВС, вес вертикальных отрезков вблизи точки старта следует уменьшить.

Горизонтальные отрезки графа, отражающего значимые для решения задачи свойства воздушного пространства или его сегмента, необходимо провести между соседними вершинами графа. Поскольку количество точек, допустимое для подачи представлений на установление местного или временного режима в органы ЕС ОрВД, не может быть бесконечно большим, а также в силу необходимости упрощения процессов планирования и контроля перемещения БВС, необходимо упрощение маршрута полета через спрямление траектории. Кроме того, маршрут полета может быть разделен на условные части и представлен в органы ЕС ОрВД с использованием нескольких документов. Из-за предполагаемого обязательного спрямления маршрута следует построить прямые отрезки между соседними точками, при этом построение диагональных отрезков не является обязательным.

Следовательно, необходимо предложить визуальный образ графа пространственных данных для решения задачи по построению оптимального маршрута полета БВС в воздушном пространстве РФ с подготовкой плана полета и представления на установление местного или временного режима. Образ представлен на Рисунке 4.7. В данном графе не предусмотрено наличие петель.



#### Условные обозначения

Уровень риска  
для полета БВС:

- · — приемлемый
- · — допустимый
- · — неприемлемый

Рисунок 4.7 – Образ взвешенного графа пространственных данных, используемый для вычисления оптимального маршрута полета БВС

Таким образом, базовые горизонтальные отрезки и вертикальный отрезок (исходя из формулы (4.1) обозначим как  $U_r$  и  $U_v$  соответственно) графа пространственных данных модели воздушного пространства или его сегмента в заданный интервал времени следует выразить формулами (4.3), (4.4) или (4.5):

$$U_r = \Phi_L \{ [P(X, Y), P(X+1", Y), Z], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \}, \quad (4.3)$$

$$U_r = \Phi_L \{ [P(X, Y), P(X, Y+1"), Z], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \}, \quad (4.4)$$

$$U_v = \Phi_L \{ [P(X, Y), (Z, Z+10 \text{ м})], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \}, \quad (4.5)$$

где  $X, Y, Z$  – параметры широты, долготы и высоты точек,

$t^{\text{нач}}$  – время начала действия оценки риска перемещения по отрезку в формате ЧЧ.ММ,

$t^{\text{нач}}$  – продолжительность действия оценки риска перемещения по отрезку в формате ЧЧ.ММ,

$A_i^R$  – значение оценки риска,

$Dr$  – тип отрезка (горизонтальный или вертикальный),

$i$  – уникальный номер отрезка.

Если в геоинформационной модели сегмента воздушного пространства для решения задачи пользователя необходимо наличие диагональных отрезков в горизонтальной плоскости или наклонных отрезков, соединяющих соседние точки в разных плоскостях, то для описания диагональных отрезков следует применить формулы (4.6) и (4.7):

$$U_d = \Phi_L \{ [P(X, Y), P(X+1", Y+1"), Z], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \}, \quad (4.6)$$

$$U_d = \Phi_L \{ [P(X, Y), P(X+1", Y-1"), Z], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \}, \quad (4.7)$$

Для описания наклонных отрезков графа предлагаются следующие формулы (4.8), (4.9).

$$U_h = \Phi_L \{ [P(X, Y, Z), (X+1", Y+1", Z+10 м)], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \} \quad (4.8)$$

$$U_h = \Phi_L \{ [P(X, Y, Z), (X+1", Y-1", Z+10 м)], [t^{\text{нач}}, t^{\text{прод}}], [A_i^R, Dr, i] \} \quad (4.9)$$

Диагональные и наклонные отрезки следует считать опциональными. В настоящей главе в иллюстрациях, на которых изображена геоинформационная модель сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных, используются только базовые отрезки (горизонтальные и вертикальные), необходимые для создания соответствующих географических образов (геообраз). Опциональные отрезки на рисунках не отображаются с целью избежать перегрузки изображения множеством графических элементов.

Поскольку в документах, направляемых в органы ЕС ОрВД, согласно требованиям нормативно-правовых документов федерального уровня, необходимо указывать время UTC, то в геоинформационной модели воздушного пространства в группе параметров «время» также следует указывать атрибут  $t^{\text{нач}}$  по времени UTC. При моделировании ограничений в воздушном пространстве, при внесении информации о геопространственных мероприятиях необходимо вносить группу параметров «время», переводя в UTC.

Для описания данного взвешенного графа сети применима формула (4.10):

$$G [R] = (V, U; R), \quad (4.10)$$

где  $R$  – весовая функция оценки риска выполнения полета БВС.

Важнейшим принципом, обеспечивающим связанность, структурность и сравнение пространственных моделей транспортной инфраструктуры, выступает концепция информационных единиц [3]. Отрезки графа, описанные с применением формул (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) являются информационными единицами модели воздушного пространства, используемой для решения задачи по построению оптимального маршрута полета БВС в воздушном пространстве РФ.

Исходя из изложенного текста сформирована схема процесса создания отрезков графа пространственных данных (Рисунок 4.8) для геоинформационного моделирования воздушного пространства. С учетом данной схемы подготовлена программа (код в приложении Приложение Б, свидетельство о регистрации в Приложении В) на языке программирования Python для формирования в среде QGIS шейп-файла, содержащего отрезки графа пространственных данных, описанных формулами (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9). Данный скрипт выполняет вспомогательную функцию. Используя шейп-файл, созданный данным скриптом, пользователь может сформировать геоинформационную модель воздушного пространства в виде графа пространственных данных.

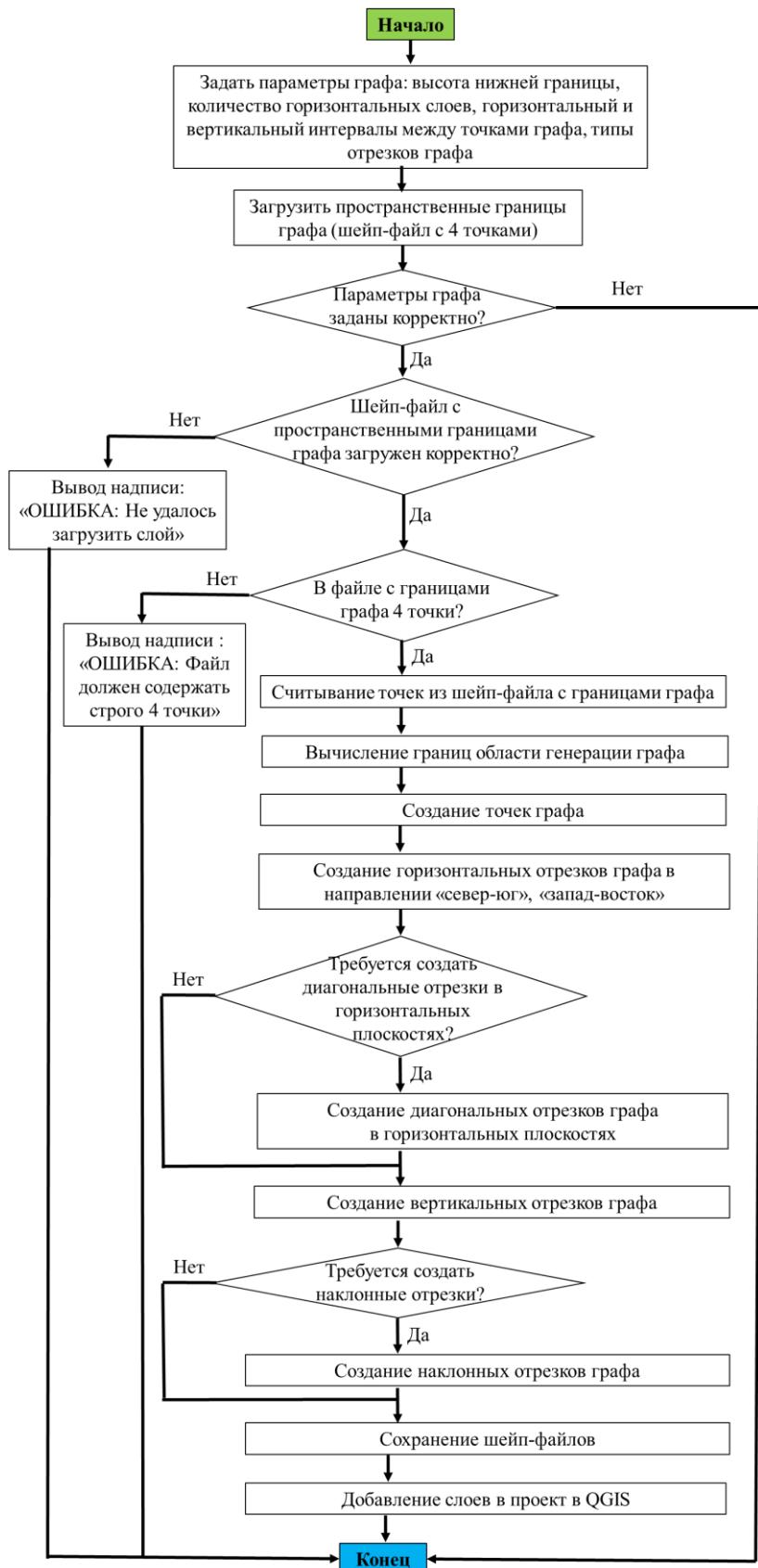


Рисунок 4.8 – Схема процесса создания отрезков графа пространственных данных для геоинформационного моделирования воздушного пространства

Отрезки графа пространственных данных станут элементами маршрута полета БВС. Маршрут полета в воздушном пространстве моделируется как конечная последовательность ребер графа, соединяющая точку старта и точку назначения. Отрезки определены по географическим координатам, высоте и интервалам времени. Для описания маршрута полета следует предложить следующую формулу (4.11):

$$S = (U_i), \quad (4.11)$$

где  $S$  – маршрут перемещения,

$(U_i)$  – совокупность уникальных отрезков геоинформационной модели воздушного пространства, последовательность которых соединяет точку старта с точкой назначения,

$i$  – уникальный номер отрезка.

При моделировании воздушного пространства в виде графа, как на Рисунке 4.6, предполагается, что для любых двух его вершин существует путь, по которому их можно соединить, то есть граф предполагается связным. Однако наличие различных категорий ограничений в воздушном пространстве или его сегменте и их комбинаций позволяет говорить о том, что в некоторые периоды граф связным не является. Граф, являющийся моделью воздушного пространства или его сегмента, следует рассматривать как информационную конструкцию, отражающую формальную топологию. Актуальная ситуация составляющая задает фактическую топологию, обеспечивающую возможность перемещения по отрезку графа и стоимость такого перемещения, что выражено в весовом значении отрезка. Таким образом, некоторые участки графа могут периодически или эпизодически утрачивать пропускную способность по причине действия ограничений в воздушном пространстве.

Материальное тело, перемещаемое по фиксированной транспортной сети в виде графа пространственных данных, моделируется в форме точки. В работе [72] для функционирования алгоритма обнаружения конфликтных ситуаций между пилотируемыми воздушными судами, связанных с несоблюдением норм эшелонирования, выполняется моделирование вокруг воздушного судна так называемой «шайбы» – цилиндра с размерами, соответствующими нормам эшелонирования. Таким образом, если модель доступного для планирования полета воздушного пространства представить в виде графа, то БВС следует моделировать в форме точки с указанием свойств объекта моделирования (размеры, максимальная взлетная масса, техническая дальность и продолжительность полета, максимальная скорость полета, эксплуатационные ограничения). Точка соответствует геометрическому центру БВС. Кроме того, при выполнении полета пользователь указывает границы, достаточные для маневрирования БВС с применением точек, ограничивающих зону полета, или точек осевой линии с указанием ширины маршрута. Границы зоны полета рассчитываются с учетом возможных отклонений от заданной траектории, в том числе для выполнения участка полета по кругу БВС самолетного типа, у которых конструкцией не предусмотрена возможность статично пребывать на заданной отметке над земной поверхностью. В решаемой задаче для учета размеров БВС (в частности, расстояние от геометрического центра до крайних точек БВС) при планировании маршрута необходимо построить дополнительные буферные зоны вокруг ограничений. С целью упрощения вычислений следует использовать данные буферные зоны для исключения из анализа («стирания») соответствующих отрезков графа. Результат изменения графа с целью учета размеров БВС представлен на Рисунке 4.9.

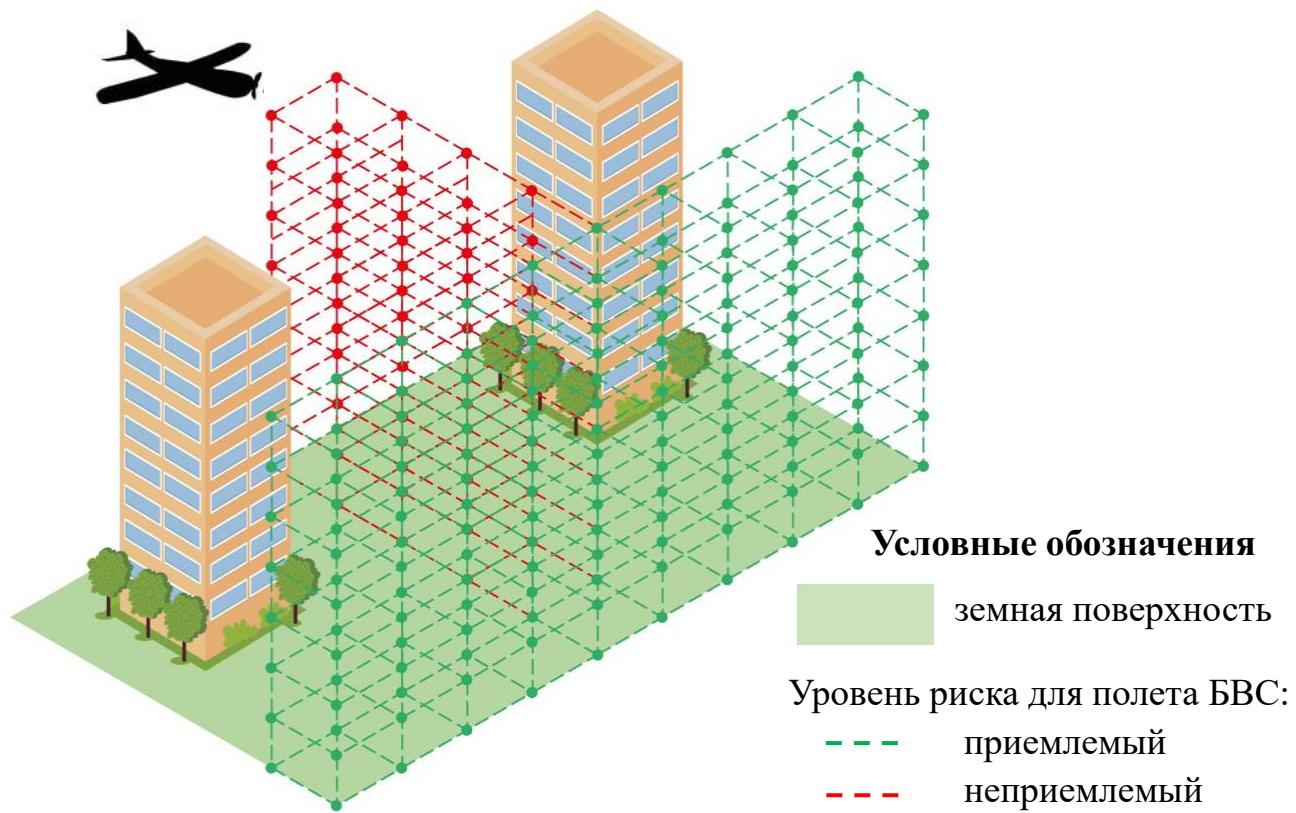


Рисунок 4.9 – Изменение графа с целью учета размеров БВС в решении задачи

Время предполагаемого начала полета устанавливается пользователем, продолжительность вычисляется исходя из предполагаемой скорости перемещения. Полеты БВС в воздушном пространстве выполняются с подачей плана полетов и выдачей разрешения на полет соответствующими органами ЕС ОрВД, за исключением случаев, предусмотренных соответствующими нормативно-правовыми документами [56]. Значительное количество полетов БВС выполняется с установлением местного или временного режима. Обработка документов выполняется с целью выдать разрешение на использование воздушного пространства или вынести обоснованный отказ. Исходя из изложенного, достаточно выполнить вычисление оптимального маршрута полета однократно, а затем в установленные нормативно-правовыми актами сроки подать необходимый комплект документов в соответствующий орган ЕС ОрВД и получить разрешение на использование воздушного пространства. Если разрешение

на выполнение получено или удовлетворено представление на установление местного или временного режима, то нет необходимости выполнять вычисления повторно. Таким образом, к началу полета или несколько заранее плановый маршрут перемещения разработан эксплуатантом и согласован органом ЕС ОрВД. При этом не следует исключать внезапные и непредсказуемые изменения ситуации в воздушном пространстве во время полета БВС, которые невозможно предусмотреть и, следовательно, учесть в геоинформационной модели.

В настоящей подглаве обоснована структура и размеры графа пространственных данных для решения задачи построения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения с целью формирования соответствующего комплекта документов для подачи в органы ЕС ОрВД. Пользователь воздушного пространства для вычисления оптимального маршрута перемещения вправе обосновать необходимые параметры графа пространственных данных, отображающие значимые для планирования полета свойства воздушного пространства или его сегмента. Однако при подготовке плана полета и представления на установление местного или временного режима предполагаемый маршрут перемещения будет обобщен с целью указания точек в географических координатах.

#### **4.2 Построение модели сегмента воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов гражданской авиации в среде полнофункциональной геоинформационной системы**

Геоинформационная модель сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных, используемого для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС, будет существенно отличаться от моделей воздушного

пространства [34, 69, 97, 119], рассмотренных в подглаве 1.5 работы. Модель воздушного пространства в виде графа пространственных данных должна учитывать свойства объекта, значимые для решения поставленной задачи, в том числе географические условия.

В настоящей главе рассмотрено моделирование сегмента воздушного пространства над территорией железнодорожной станции Кинель и прилегающей местности с целью вычисления оптимальных маршрутов перемещения БВС для передачи грузов менее 2,5 кг, в том числе документов на бумажных носителях, между производственными объектами железнодорожной инфраструктуры в течение календарного года. Для данных полетов предполагается использование БВС мультироторного типа с техническими характеристиками согласно Таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Технические характеристики БВС для выполнения полетов в моделируемом сегменте воздушного пространства

Характеристика	Параметр
Габариты БВС (длина*ширина*высота)	850 × 720 × 430 мм
Тип взлета	вертикальный
Тип двигателя	электродвигатель
Время полета	До 55 мин.
Техническая дальность	15 км
Скорость полета	до 17 м/с
Точность позиционирования в вертикальной плоскости	±0,5 м
Точность позиционирования в горизонтальной плоскости	±0,9 м
Максимальная взлетная масса	9,0 кг
Вес	6,5 кг
Температура рабочей среды	от -20°C до +50°C
Максимальная скорость ветра	15 м/с
Степень защиты	IP45
Полет в условиях грозы	запрещено
Постоянная двухсторонняя радиосвязь с органом обслуживания воздушного движения	нет
Период эксплуатации	3 года
Отказы техники в период эксплуатации	нет
Максимальный срок эксплуатации	8 лет

Наличие степени защиты IP45 означает, что БВС защищен от попадания внутрь оболочки твёрдых тел размерами не менее 1,0 мм и от попадания внутрь оболочки струй, падающих под любым углом.

Для выявления значимых для моделирования свойств реального пространственного объекта необходима комплексная географическая характеристика. Сегмент воздушного пространства следует рассматривать как наземный пространственный объект, в отношении которого применяются геоинформационные методы исследования. В настоящее время в научной литературе отсутствуют примеры географического описания сегментов воздушного пространства. Исходя из имеющегося в научной литературе опыта географических исследований, особенностей воздушного пространства как сложной многокомпонентной системы, значимых сторон объекта моделирования, решаемой задачи по вычислению оптимального маршрута БВС, необходимо предложить следующее описание.

Объект моделирования – сегмент воздушного пространства над территорией железнодорожной станции Кинель и прилегающей местности. Территория объекта моделирования (площадь 2,56 км<sup>2</sup>) расположена в границах Кинельского городского округа Самарской области Российской Федерации. Протяженность объекта моделирования с северо-запада на юго-восток более 5,5 км, с северо-востока на юго-запад более 500 м. Рельеф объекта моделирования равнинный. В границах подстилающей поверхности объекта моделирования расположены водные объекты: р. Язевка, оз. Крымское и 2 объекта без названия, отмеченные на картах. Климат умеренно-континентальный, годовая амплитуда температуры воздуха от -15 °C до 27 °C, среднегодовое количество осадков (дождь, снег, туман и другие) 565 мм, средняя скорость ветра не более 5 м/с. Абсолютная минимальная температура воздуха -43 °C, абсолютная максимальная составляет 40 °C.

Изучаемый сегмент воздушного пространства находится в пределах района аэродрома Бобровка Самарского района полетной информации, класс воздушного

пространства – С. Запретных зон, опасных зон, зон ограничения полетов, специальных зон в пределах объекта моделирования нет. Сегмент воздушного пространства находится вне приграничной полосы. Воздушные трассы находятся на удалении более 14 км. Ближайшие аэродромы – Бобровка (9,7 км на юго-восток) и Преображенка (8,9 км на северо-восток). Ближайшая посадочная площадка для вертолетов – Самаринская (11,1 км на запад). Ближайший международный аэропорт – Курумоч (40,3 км на северо-запад). На аэродроме Бобровка выполняются полеты пилотируемой авиации для парашютных прыжков. Информация о полетах на аэродроме Преображенка отсутствует. Объект моделирования расположен в пределах населенного пункта – г. Кинель. К западу от моделируемого сегмента воздушного пространства расположены ключевые орнитологические территории Самарская Лука (28,1 км) и Чапаевские Лиманы (31,2 км), к востоку – Бузулукский Бор (53, 3 км).

На территории объекта моделирования расположена узловая двухстороння сортировочная железнодорожная станция, по которой осуществляется движение грузовых и пассажирских поездов. На территории станции Кинель функционирует множество предприятий железнодорожного узла. Вокзал и посадочная платформа расположены между путями. По станции осуществляется движение грузовых и пассажирских поездов. В актуальном расписании прибытия и отправления пассажирских поездов в летний период календарного года содержится информация о 18 пассажирских поездах, проезжающих станцию Кинель с остановкой не более чем на 5 минут. В наличии пересечение железнодорожных путей с автомобильной дорогой в восточной части объекта моделирования, путепровод в западной части, надземный пешеходный переход железнодорожных путей в центральной части, а также наземный в районе здания вокзала. На железнодорожной станции Кинель установлено множество жестких поперечин. На территории объекта моделирования в наличии древесно-кустарниковая растительность.

Таким образом, технические возможности предлагаемого БВС позволяют выполнять полеты на объекте моделирования в течение календарного года, за исключением отдельных случаев несоответствия погодным условиям, например, крупный град или гроза. Перед выполнением полета необходимо подать представление на установление местного режима и план полета в Самарский Региональный центр ЕС ОрВД в сроки, установленные требованиями нормативно-правовых документов [81]. Обязательным условием выполнения полета БВС является наличие разрешения от соответствующего органа местного самоуправления, поскольку полет выполняется в границах населенного пункта. Моделирование сегмента воздушного пространства выполнено в период действия запрета на полеты БВС над территорией Самарской области, поэтому полет станет возможным только при условии снятия данного запрета или получения разрешения на пилотирование. Объект моделирования расположен на удалении от ключевых орнитологических территорий.

В качестве исходных данных для построения геоинформационной модели сегмента воздушного пространства использованы ортофотоплан (Рисунок 4.10) и цифровая модель местности, построенные по результатам аэрофотосъемки специалистами АО «НИИАС» территории объекта моделирования. В настоящей подглаве ортофотоплан территории объекта моделирования и другие иллюстративные геоизображения выполнены в проекции WGS 84 / UTM zone 39N для упрощения визуального восприятия.

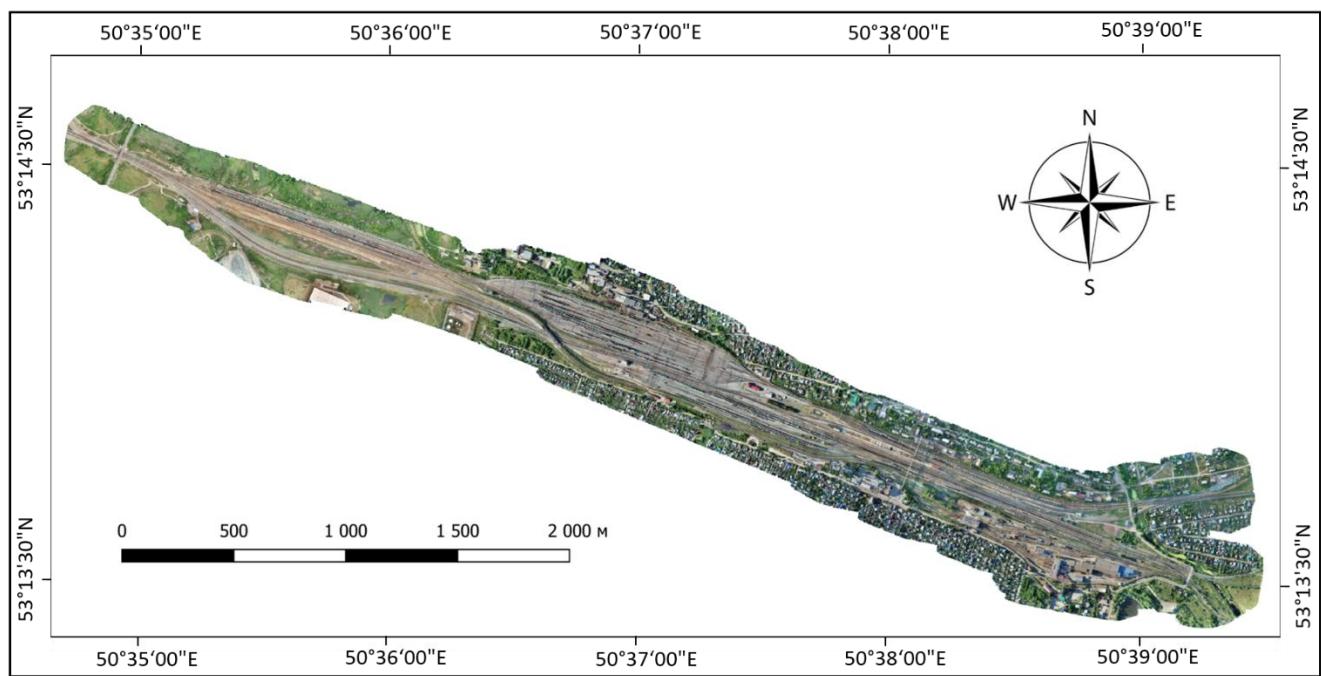


Рисунок 4.10 – Ортофотоплан, построенный по результатам аэрофотосъемки железнодорожной станции Кинель и прилегающей территории

Для построения геоинформационной модели сегмента воздушного пространства выбрано бесплатное геоинформационное программное обеспечение с открытым исходным кодом QuantumGIS (далее – QGIS). Диапазон высот цифровой модели местности – от 34,1 м до 55,8 м абсолютной высоты. Высота нижнего слоя горизонтальных отрезков – 40 м. В целях моделирования необходимо установить верхнюю границу модели сегмента воздушного пространства – высоту верхнего слоя горизонтальных отрезков. В рамках решения настоящей задачи высота ограничена значением в 90 м. Геоинформационная модель воздушного пространства реализована в виде графа пространственных данных, точки расположены с интервалом 1" в плоскости и 10 м по высоте. Построение оптимального маршрута перемещения выполняется с целью подачи представления на установление местного режима, показатель технической дальности и продолжительности полета БВС существенно превышает расстояние между стартово-посадочными площадками. На основе указанных точек созданы горизонтальные и псевдовертикальные отрезки.

Полеты БВС ограничены рельефом местности, зданиями и сооружениями, древесно-кустарниковой растительностью. В качестве ограничения для пилотирования БВС следует учитывать железнодорожные пути с учетом максимально возможной высоты подвижного состава. Надземными объектами, препятствующими пилотированию полетов БВС являются путепровод, пешеходный переход в центральной части объекта, железнодорожный мост, линия электропередач и множество жестких поперечин над железнодорожными путями. Моделирование ограничений в пространстве по причине наличия материальных объектов соответствует подглаве 2.4 работы. Данные объекты формируют нижнюю границу модели сегмента воздушного пространства. По причине наличия ограничений необходимо стереть соответствующие отрезки графа с целью сохранения структуры доступного воздушного пространства, доступного для полетов БВС.

Для построения геоинформационной модели сегмента воздушного пространства выполнена оценка риска полета БВС с позиции гипотетического эксплуатанта. Предполагаемые полеты выполняются экипажем из двух внешних пилотов с опытом эксплуатации заявленного типа (модели) БВС – 2 года, стаж работы в области практического применения БАС – 3 года, авиационных инцидентов и происшествий в профессиональной деятельности не допускали. Благодаря наличию у членов экипажа достаточного опыта практического применения и эксплуатации беспилотной авиационной техники значение переменной  $\Phi_{\text{эк}}$  составляет 1,2 балла. Поскольку в решаемой задаче предполагается пилотирование на расстояние не более 5,5 км, следует предположить, что за время выполнения полета ухудшение способности внешних пилотов к реагированию на чрезвычайные обстоятельства не может ухудшиться. По причине соответствия технических характеристик БВС погодно-климатическим условиям в течение календарного года, а также отсутствия отказов в период эксплуатации заявленного БВС переменной  $\Phi_{\text{бвс}}$  присвоено значение 1,3 балла.

Оценка рисков выполнения полета БВС выполнена с учетом опасности непреднамеренного падения БВС на железнодорожные пути или междупутье, на подвижной состав, на участки возможного скопления людей, с учетом возможного столкновения со зданиями и сооружениями, а также предполагаемого ущерба от данных событий.

С целью вычисления веса отрезков модели сегмента воздушного пространства необходимо выполнить оценку рисков с позиции гипотетического эксплуатанта БВС. В рассматриваемом сегменте воздушного пространства на участке, в границах которого находятся железнодорожный вокзал и посадочная платформа, количественный показатель оценки рисков увеличивается в период от начала подготовки пассажиров к посадке до окончания перемещения высадившихся пассажиров и сопровождающих за пределы станции. В целях моделирования обозначим, что указанный период начинается за 15 минут до прибытия пассажирских поездов и заканчивается спустя 15 минут после отправления пассажирского поезда. На остальных участках сегмента воздушного пространства показатель оценки рисков с течением времени не меняется. В Таблице 4.2 участкам объекта моделирования присвоены значения в соответствии с оценкой рисков гипотетического эксплуатанта.

Таблица 4.2. – Оценка рисков выполнения полетов БВС в воздушном пространстве над железнодорожной станцией Кинель и прилегающей территорией

Описание участка для пилотирования	Оценка риска, балл
<b>Участки с постоянным уровнем риска</b>	
над земной поверхностью без зданий, сооружений и древесно-кустарниковой растительности	1
над земной поверхностью с древесно-кустарниковой растительностью	1,2
над водными объектами	1,4
над железнодорожными путями и междупутьем	2
над объектами инфраструктуры железнодорожного транспорта	3
на расстоянии менее 20 м от пересечения железнодорожных путей с автомобильной дорогой, железнодорожного моста, путепровода, надземного и наземного пешеходного перехода железнодорожных путей	4
над другими зданиями и сооружениями, над автомобильными дорогами	2,5
<b>Участки с изменчивым уровнем риска</b>	

## Продолжение Таблицы 4.2

над зданием железнодорожного вокзала и прилегающей территорией	3
над посадочной платформой	2
над зданием железнодорожного вокзала, посадочной платформой и прилегающей территорией в период перемещения пассажиров и сопровождающих для посадки или высадки	5

Следует учитывать повышенную вероятность столкновения БВС с препятствиями при низкой высоте полета. Требуется установить коэффициенты для увеличения значения оценки риска отрезка модели при уменьшении высоты пилотирования: не более, чем 10 м от земной поверхности или наземного объекта – в 1,5 раза, 20 м – в 1,3 раза, 30 м – в 1,1 раза. Если отрезок графа расположен над несколькими объектами с различным уровнем риска, отрезку следует присвоить наибольшее значение. Таким образом диапазон значений оценки рисков – от 1,00 до 7,50 баллов. Для оценки приемлемости пилотирования БВС по отрезкам в моделируемой ситуации установлены следующие значения: выполнение полета приемлемо – от 1,00 до 4,00 баллов, допустимо – от 4,01 до 6,50 баллов, неприемлемо – от 6,51 до 7,50 баллов.

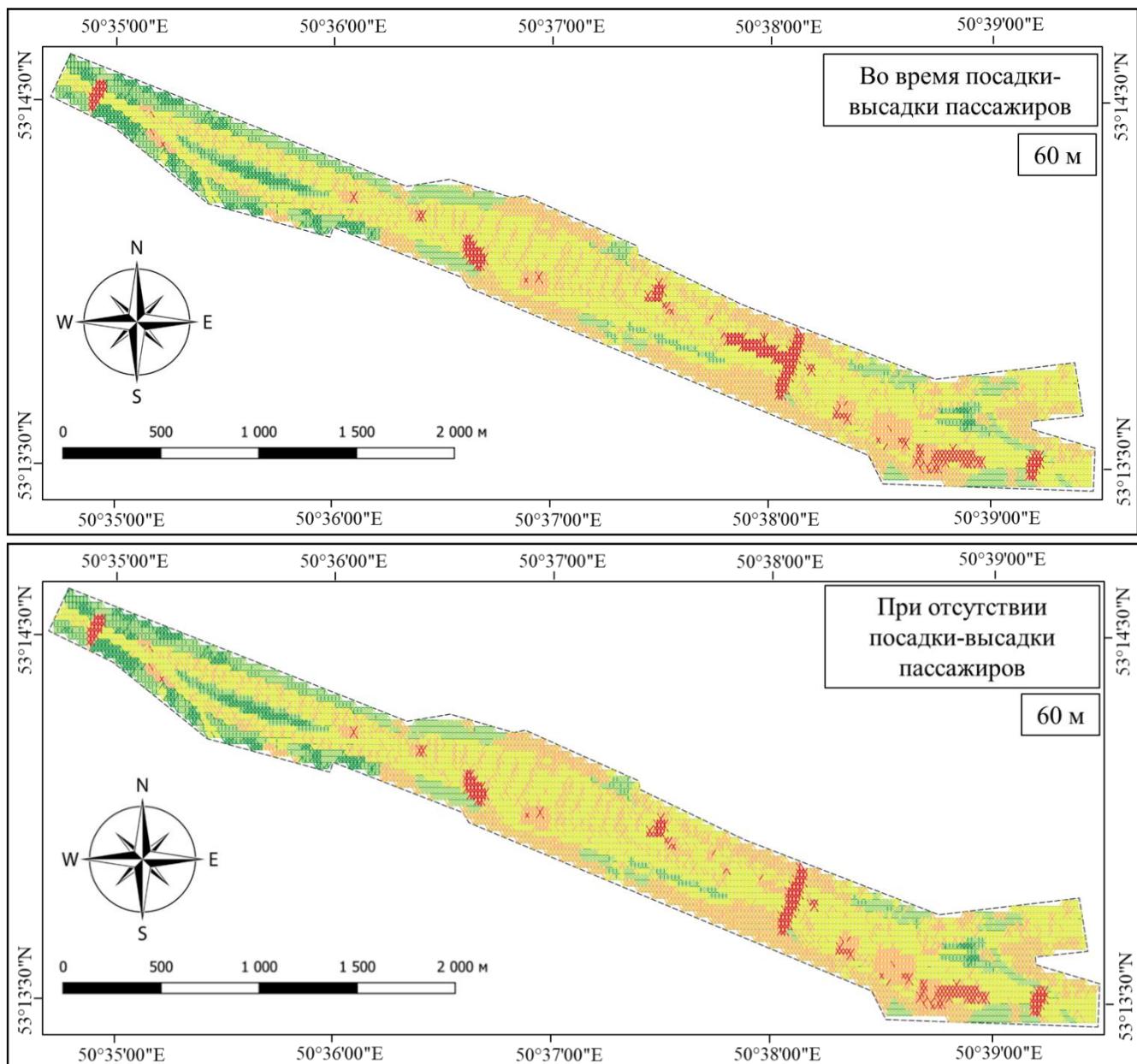
Весовое значение отрезков формируется с учетом оценки рисков и протяженности отрезка. На объекте моделирования протяженность горизонтальных отрезков в направлении «север-юг» больше, чем у отрезков в направлении «восток-запад», примерно в 1,67 раза. Соответственно, при вычислении поля «вес» отрезков в направлении «север-юг» необходимо результаты оценки рисков умножить на 1,67. В свою очередь, протяженность горизонтальных отрезков в направлениях «северо-запад – юго-восток» и «северо-восток – юго-запад» в 1,94 раза больше, чем у отрезков в направлении «восток-запад». Протяженность псевдовертикальных отрезков примерно в 1,85 раза меньше, чем у горизонтальных отрезков в направлении «восток-запад». Вычисляя весовое значение псевдовертикальных отрезков, необходимо результаты оценки рисков уменьшить в 1,85 раза.

В процессе выполнения полетного задания нежелательно часто менять высоту полета. Поэтому вес псевдовертикальных отрезков в процессе подготовки графа к вычислению оптимального маршрута перемещения увеличен в 2,5 раза. Вместе с тем, если в целях безопасности полета набор высоты выполняется под визуальным контролем внешних пилотов, то вес псевдовертикальных отрезков над стартово-посадочными площадками, где присутствуют внешние пилоты, может быть значительно уменьшен.

На участке с изменчивым уровнем риска находятся несколько наборов отрезков с идентичным положением в пространстве. У данных информационных единиц различаются значения полей в таблице атрибутов, в том числе весовое значение и интервалы времени, в которые доступно перемещение по данным отрезкам. При построении модели следует учитывать, что в одно и то же время не должны быть доступными для перемещения несколько отрезков с идентичным пространственным положением.

В реализуемой геоинформационной модели сегмента воздушного пространства диапазон весовых значений отрезков, по которым выполняется перемещение БВС – от 1,56 до 22,70 баллов, значение вычислено по формуле (3.2).

На Рисунке 4.11 отображены горизонтальные отрезки взвешенного графа пространственных данных, соответствующие абсолютной высоте 60 м, цветовое обозначение выполнено для визуализации оценки рисков пилотирования БВС. Геоизображение горизонтальных отрезков данного графа на уровнях модели сегмента воздушного пространства (абсолютная высота 40 м, 50 м, 60 м, 70 м, 80 м и 90 м) приведено в Приложении А. Данные геоизображения выполнены для периодов времени, когда предполагается перемещение пассажиров и сопровождающих для посадки или высадки, а также для тех периодов, когда данные действия не выполняются.



### Условные обозначения

Вес отрезков, балл

- |                                       |               |                                                                  |                              |
|---------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <span style="color: green;">—</span>  | 1,00 – 3,50   | <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">60 м</span> | высота отрезков графа (абс.) |
| <span style="color: green;">—</span>  | 3,51 – 5,50   |                                                                  |                              |
| <span style="color: yellow;">—</span> | 5,51 – 8,50   | <span style="color: black;">—</span>                             | граница модели сегмента      |
| <span style="color: orange;">—</span> | 8,51 – 12,00  | <span style="color: black;">—</span>                             | воздушного пространства      |
| <span style="color: red;">—</span>    | 12,01 – 22,70 |                                                                  |                              |

Рисунок 4.11 – Отрезки взвешенного графа пространственных данных.

Для структурирования общей информации о процедурах и действиях, выполненных с шейп-файлом, с целью формирования риск-ориентированной геоинформационной модели воздушного пространства, создана блок-схема с описанием данного процесса (Рисунок 4.12). Следует учитывать, что эксплуатанты БАС различных типов (моделей) самостоятельно оценивают риски в соответствии со спецификой своей деятельности и формируют весовые значения отрезков, поэтому на данной блок-схеме отсутствуют конкретные числовые значения.

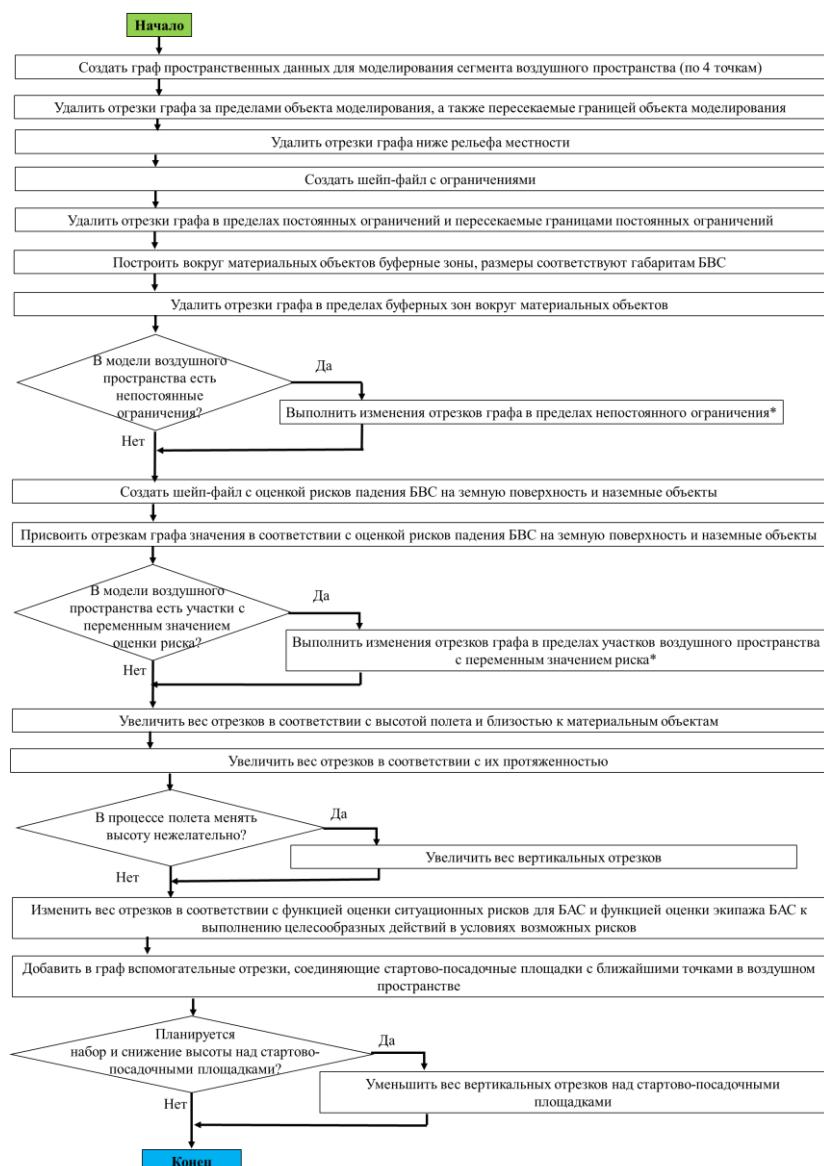
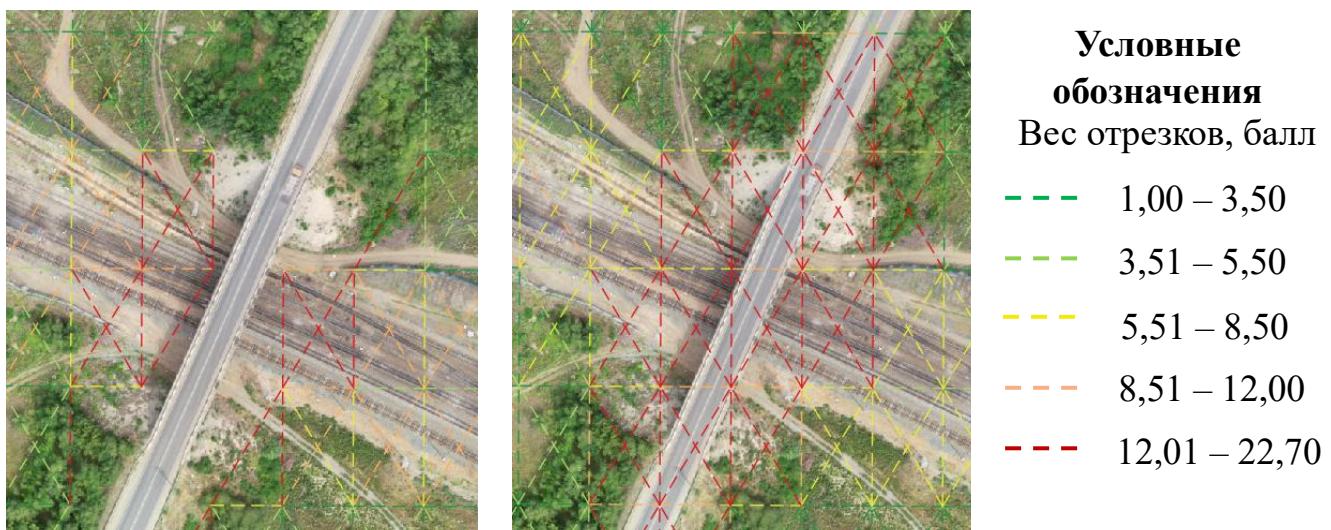


Рисунок 4.12 – Блок-схема процесса формирования риск-ориентированной геоинформационной модели воздушного пространства

В геоинформационной модели сегмента воздушного пространства горизонтальные отрезки на высоте от 60 м, 70 м, 80 м, 90 м образуют непрерывную сеть в границах объекта моделирования, тогда как совокупность горизонтальных отрезков на высоте 40 м и 50 м прерывиста по причине наличия материальных объектов, ограничивающих перемещение. Псевдовертикальные отрезки выполняют вспомогательную функцию, соединяя вершины горизонтальных отрезков. Таким образом граф пространственных данных, учитывая ограничения для перемещения, сохраняет структуру доступного воздушного пространства. На Рисунке 4.13 изображены фрагменты модели сегмента воздушного пространства в виде взвешенного графа в районе пересечения железнодорожных путей и автомобильного моста. На Рисунке 4.13 слева изображен фрагмент графа пространственных данных, в котором отсутствуют отрезки на высоте 50 м по причине наличия материального объекта – автомобильного моста. На рисунке 4.13 справа в фрагменте взвешенного графа изображены отрезки на высоте 60 м над автомобильным мостом.



Высота отрезков (абс.):  
50 м

Высота отрезков (абс.):  
60 м

Рисунок 4.13 – Фрагменты модели сегмента воздушного пространства в виде взвешенного графа в районе пересечения железнодорожных путей и автомобильного моста

В качестве стартово-посадочных площадок выбраны точки на горизонтальных поверхностях на расстоянии производственных зданий, значимых для обеспечения функционирования железнодорожного транспорта (вокзал, дом диспетчеров, пожарная часть, локомотивное депо и другие). Точки, соответствующие стартово-посадочным площадкам на земной поверхности, соединены с графом пространственных данных вспомогательными отрезками.

Для вычисления оптимальных маршрутов необходимо выполнить анализ информационных единиц геоинформационной модели сегмента воздушного пространства. Блок-схема, на которой обобщенно изображены основные элементы анализа данной геоинформационной модели с целью вычисления оптимального маршрута БВС из точки старта в точку назначения, приведена на Рисунке 4.14. На основе логики данной схемы написана программа на языке программирования Python (код в Приложение Б, свидетельство о регистрации в Приложении В), который выбирает путь с наименьшим суммарным весом маршрута из точки старта в точку назначения. Обязательными атрибутами входного графа пространственных данных являются поля «тип\_отрезка», «Z» (высота), «вес», «длина», «время начала», «продолжительность». Точка старта и точка назначения должны быть внесены в соответствующие шейп-файлы. При выборе оптимального маршрута учитывается ограничение по технической дальности полета БВС. В основе данного скрипта лежит использование алгоритма Дейкстры для решения соответствующей задачи в среде QGIS. В скрипте предусмотрена возможность задать коэффициенты значимости для веса отрезков и их протяженности. Данные коэффициенты необходимо подбирать, исходя из предпочтений эксплуатанта и количественных значений оценки риска в геоинформационной модели сегмента воздушного пространства. В решаемой в настоящей работе задаче функция суммы весовых значений стремится к минимуму, а общая протяженность маршрута не должна превышать технической дальности и продолжительности полета конкретного БВС. Исходя из требований к решению задачи, а также оценки рисков гипотетического

эксплуатанта в моделируемом сегменте воздушного пространства, установлены следующие коэффициенты значимости: для протяженности отрезков – 0, для веса отрезков – 1.

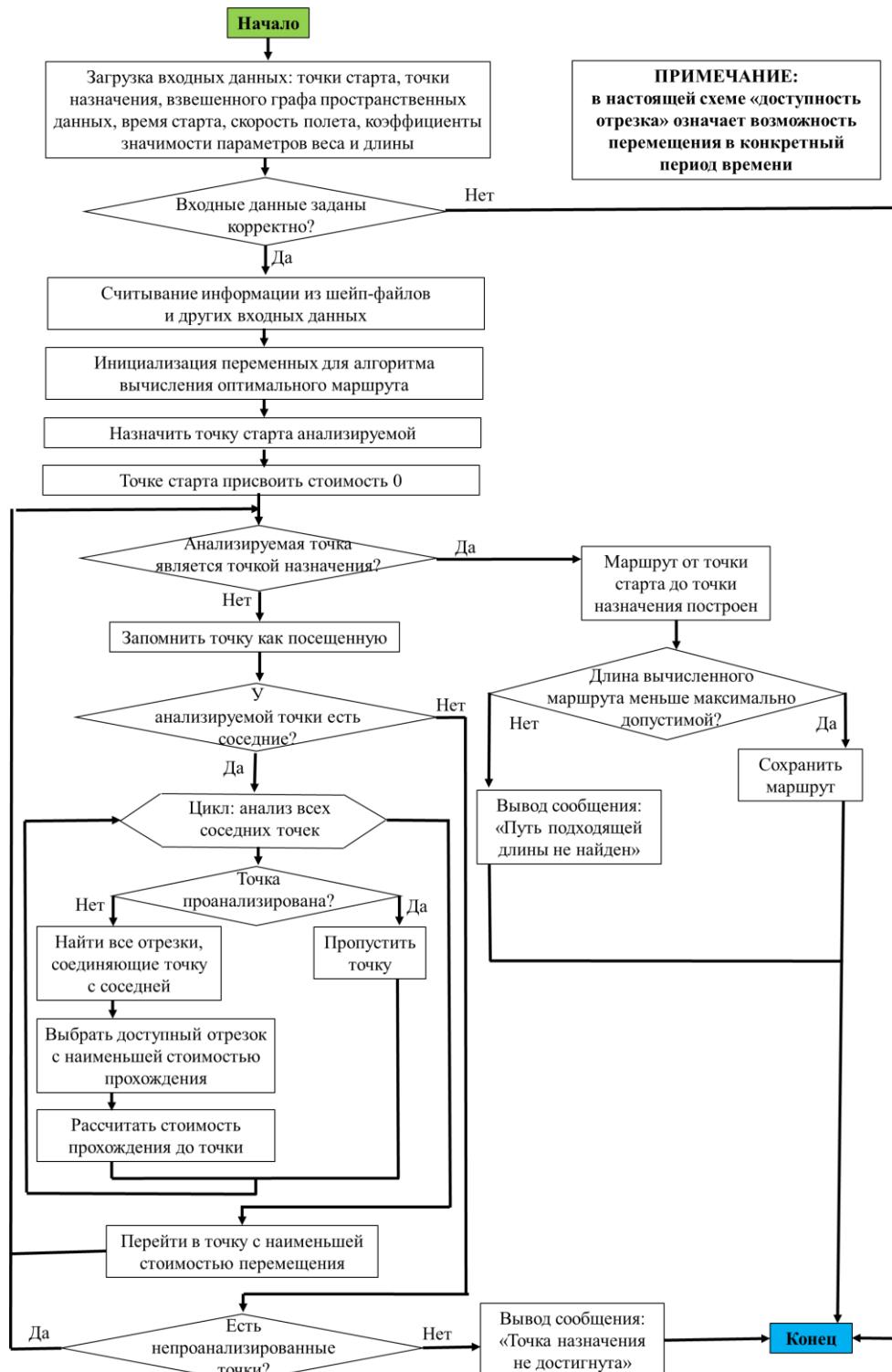


Рисунок 4.14 – Схема процесса вычисления оптимального маршрута БВС из точки старта в точку назначения

Результатом применения разработанного скрипта для вычисления оптимальных маршрутов полетов БВС, использующего модель сегмента воздушного пространства в виде взвешенного графа, является шейп-файл, содержащий последовательность горизонтальных и псевдовертикальных отрезков, соединяющих точку старта и точку назначения, с наименьшим суммарным весом маршрута из всех возможных. Скрипт не может вывести несколько маршрутов перемещения с одинаковой суммой весовых значений, будет выведен только тот маршрут, который найден первым. Данный маршрут удовлетворяет критериям, заданным пользователем до запуска скрипта. Если полученный результат не устраивает пользователя, следует внести изменения во входные данные. Если соединить точку старта с точкой назначения при заданных параметрах последовательностью отрезков графа невозможно, выводится сообщение «Путь не найден». Маршруты, получаемые в результате работы скрипта, актуально «спрятать» (при условии, если риск полета БВС не увеличится) для уменьшения количества точек в представлениях на установление местного или временного режима и плана полета.

В ходе работы выполнены вычисления оптимальных маршрутов БВС из точки старта в точку назначения в границах моделируемого сегмента воздушного пространства. В настоящей подглаве рассмотрено несколько гипотетических ситуаций на объекте моделирования, приведено соответствующее описание вычисленных маршрутов перемещения между стартово-посадочными площадками. На Рисунке 4.15 изображен оптимальный маршрут полета БВС между двумя стартово-посадочными площадками около производственных зданий, вычисленный с использованием модели сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных. Маршрут соединяет площадки в северо-восточной и юго-западной частях объекта моделирования. На основе данного шейп-файла возможно описать предполагаемый маршрут полета для оформления представления на установление местного режима.

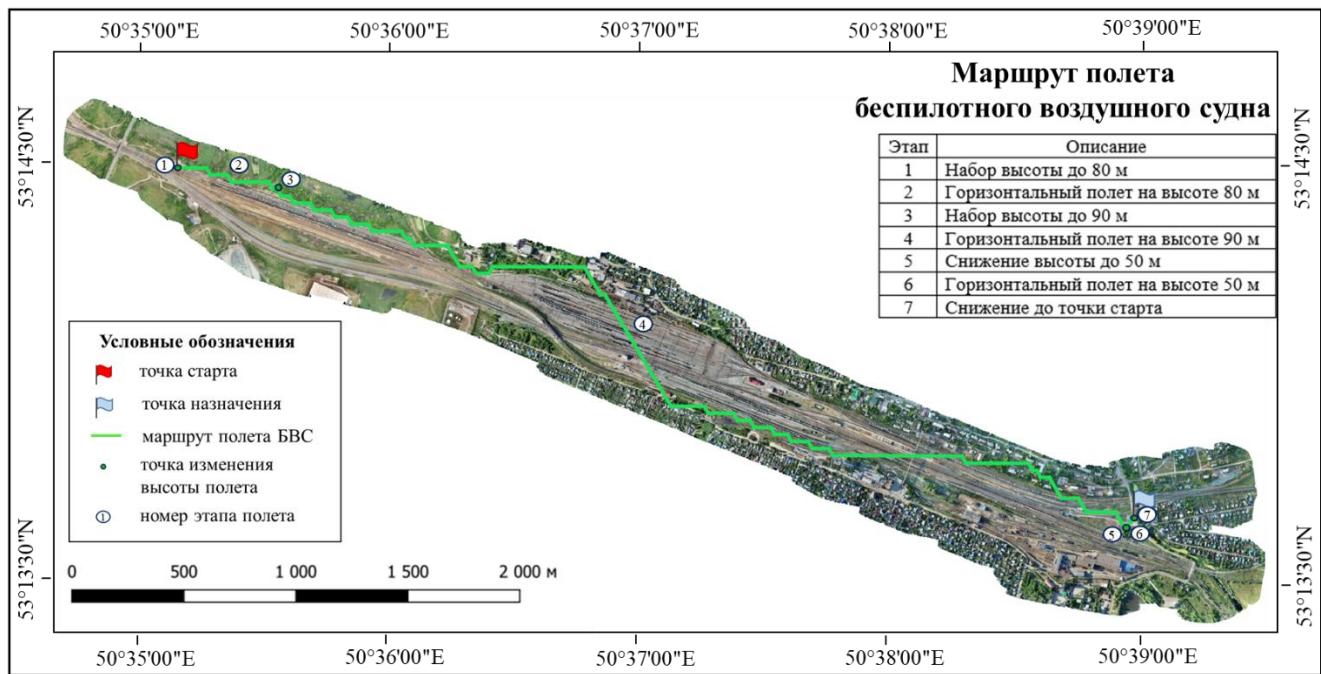


Рисунок 4.15 – Оптимальный маршрут БВС между стартово-посадочными площадками

Оптимальный маршрут перемещения, изображенный на Рисунке 4.15, имеет наименьший вес из возможных: полет БВС выполняется над участками территории, покрытыми травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, а также над железнодорожными путями. Набор высоты выполняется над точкой старта и над участком с травянистой растительностью, на котором отсутствуют здания и сооружения. Снижение высоты выполняется над участком с древесно-кустарниковой растительностью и над точкой назначения. Основная часть маршрута перемещения находится на высоте 90 м над территорией с травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, а также над железнодорожными путями. В начале маршрута имеется участок общей протяженностью около 480 м с высотой пилотирования 80 м. Полет выполняется со скоростью 5 м/с. Значение поля «риск» отрезков маршрута не более 4 баллов (приемлемо). Данный маршрут находится в отдалении от объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и участка с переменным уровнем риска.

Маршрут полета, изображенный на Рисунке 4.15, вычислен при коэффициентах значимости 0 и 1 для протяженности и весового значения отрезков соответственно. Предположим, что необходимо вычислить более короткий маршрут. При изменении значения коэффициентов на 1 для протяженности отрезков и 2 для их весового значения в результате применения соответствующего алгоритма вычисления оптимального маршрута получен результат, изображенный на Рисунке 4.16. Уровень риска выполнения перемещения по отрезкам модели не более 4 баллов (риск приемлемый).

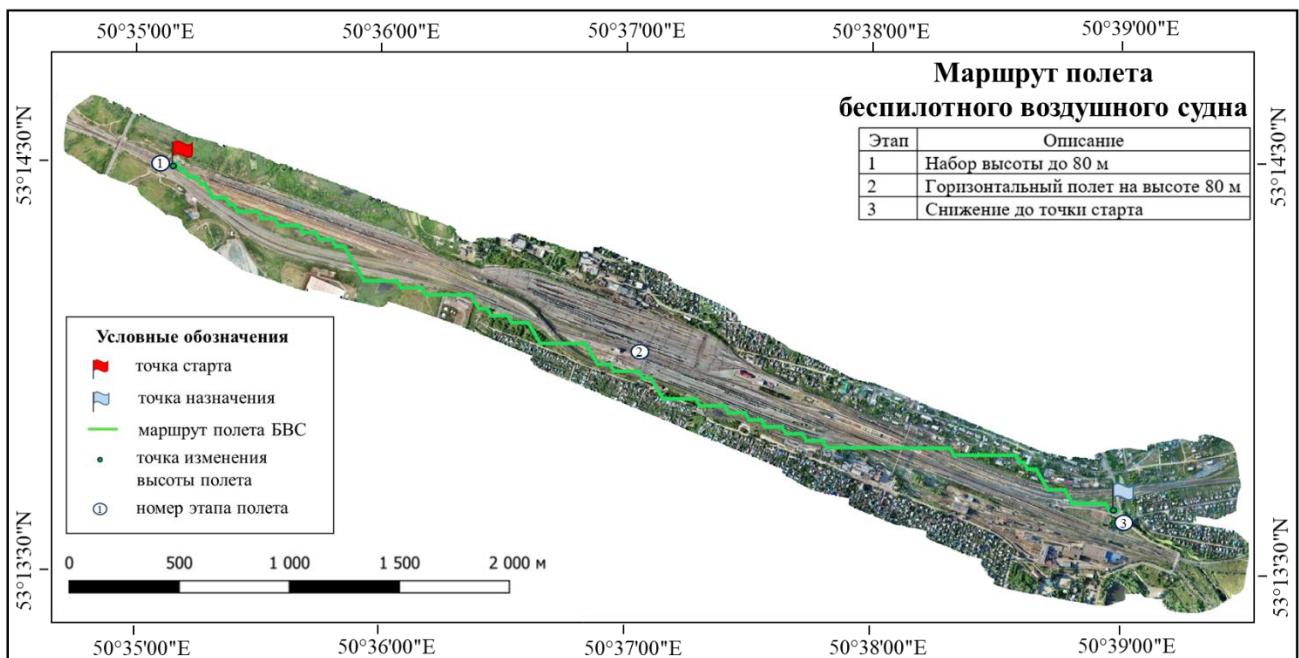


Рисунок 4.16 – Оптимальный маршрут БВС между стартово-посадочными площадками

Для проверки корректности принципов функционирования геоинформационной модели воздушного пространства в виде графа пространственных данных рассмотрим дополнительные гипотетические ситуации на объекте моделирования. Выполним моделирование ситуации, при которой на одном из участков, по которому проходит маршрут, изображенный на Рисунке 4.16, установлен местный режим для выполнения работ с применением другого БВС в период с 00.00 до 23.59 UTC. Данный местный режим (высота от поверхности земли до 100 м AMSL) следует рассматривать как ограничение

в сегменте воздушного пространства (Рисунок 4.17), а у отрезков графа на расстоянии менее 20 м от данного ограничения следует увеличить уровень риска в 1,3 раза. Таким образом, необходимо изменение атрибутов отрезков в границах действия местного режима, а также атрибутов отрезков графа на расстоянии менее 20 м от местного режима. В рассмотренной ситуации оптимальный маршрут, вычисленный с применением скрипта, построен за пределами ограничения, с избеганием отрезков с повышенным риском. Рассмотренная в настоящем абзаце гипотетическая ситуация изображена на рисунке 4.17.

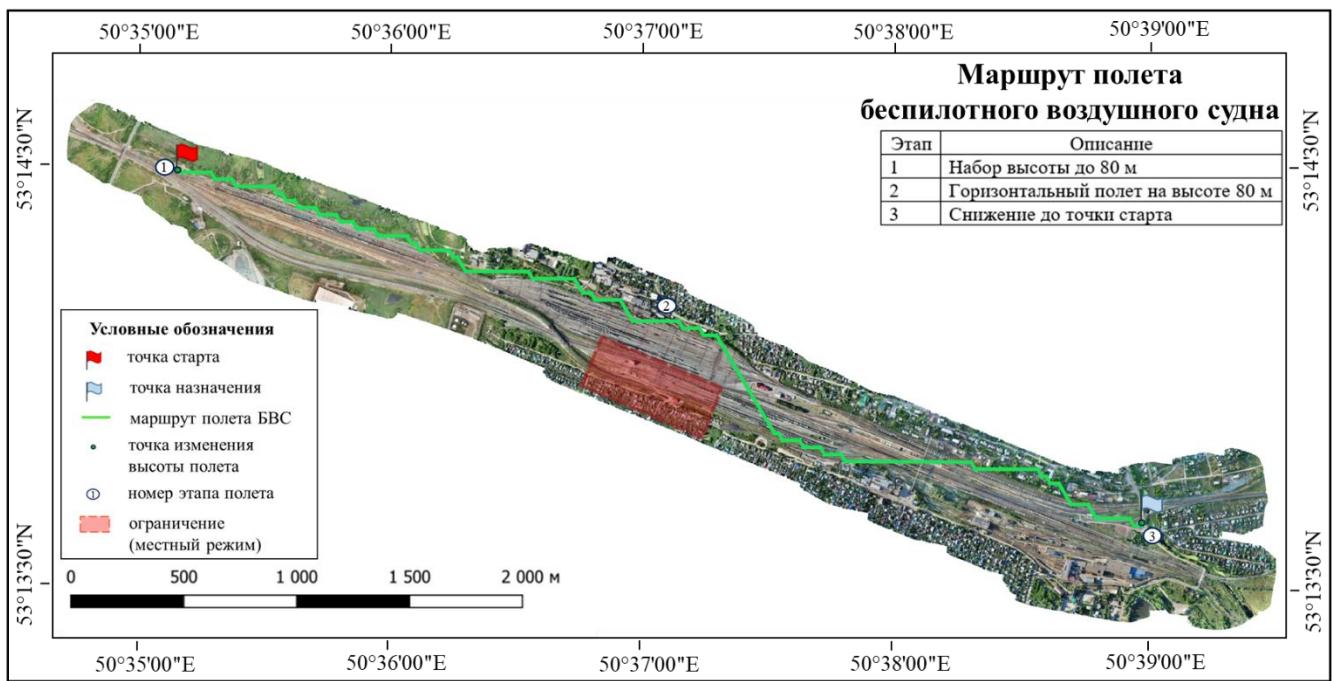


Рисунок 4.17 – Оптимальный маршрут БВС между стартово-посадочными площадками при наличии ограничения

В рамках еще одной гипотетической ситуации заданы две стартово-посадочные площадки, между которыми находится железнодорожный вокзал и посадочная платформа – объект с переменным уровнем риска. На Рисунке 4.18 изображены маршруты полетов БВС в период посадки-высадки пассажиров поездов, а также в интервалы времени, когда движение пассажирских поездов не осуществляется. В данной ситуации намеренно уменьшено весовое значение псевдовертикальных отрезков над стартово-посадочными площадками.

### Маршрут полета беспилотного воздушного судна



Рисунок 4.18 – Оптимальные маршруты БВС между стартово-посадочными площадками вблизи железнодорожного вокзала и посадочной платформы станции Кинель

Таким образом, геоинформационная пространственно-временная модель сегмента воздушного пространства над железнодорожной станцией Кинель и прилегающей территорией в виде графа пространственных данных, реализованная в настоящей работе, пригодна для применения инструментов вычисления оптимальных маршрутов перемещения БВС гражданской авиации.

### 4.3 Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного пространства или его сегмента для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации

В настоящей подглаве рассматривается методика построения разработанной и обоснованной в настоящей работе геоинформационной пространственно-временной модели воздушного пространства, используемой для применения

алгоритмов вычисления оптимальных маршрутов БВС из точки старта в точку назначения (далее – методика). Информация о методике создания данной модели структурирована в соответствии с этапами выполнения действий, также сформированы практические рекомендации применения методики. Данная методика может быть применена для моделирования сегментов воздушного пространства над территорией других географических объектов.

Целью субъекта, организующего применение и эксплуатацию БАС, является обеспечение успешного выполнения полетов БВС из точки старта в точку назначения в условиях приемлемого или допустимого риска и снижение издержек от выполнения полетов по субоптимальным маршрутам. на основе использования геоинформационной модели воздушного пространства. Методику геоинформационного моделирования воздушного пространства следует применять с учетом существующих теоретических аспектов проектирования и построения геоинформационных моделей объектов и явлений, специфики воздушного пространства как локализованной системы, а также особенностей деятельности эксплуатанта БВС, в том числе индивидуальных. Этапы данной методики перечислены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3. – Этапы методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации

Номер этапа	Название
1	Определение рабочей области моделирования
2	Сбор информации об объекте моделирования
3	Моделирование допустимой зоны перемещения БВС
4	Оценка приемлемость воздушного пространства для пилотирования БВС
5	Определение соотношения значимости для пользователя параметров весового значения и длины отрезков
6	Применение инструментов вычисления оптимального маршрута
7	Оценка полученных результатов
8	Корректировка модели воздушного пространства и других данных

Первым этапом методики геоинформационного моделирования воздушного пространства или его сегмента для вычисления оптимальных маршрутов БВС

является определение рабочей области моделирования – пространственных границ объекта и интервала времени. На втором этапе выполняется сбор информации об объекте моделирования, в том числе анализ информации о географических условиях, нормативно-правовых актов различного уровня в части, касающейся использования воздушного пространства или его сегмента, о факторах опасности для полетов БВС для планируемого полета, о технических характеристиках и состоянии БВС для выполнения конкретного полетного задания, о стартово-посадочных площадках и дополнительной информации, значимой для пользователя. На основе собранной информации возможно обосновать актуальный размер отрезков и создать граф пространственных данных, который станет основой модели. Следующим этапом является определение и моделирование допустимой зоны перемещения БВС, в ходе которого выполняется выявление различных типов ограничений в воздушном пространстве для планирования полета БВС и исключений из них (если предусмотрено). В участках сегмента, где ограничения присутствуют постоянно, необходимо удалить соответствующие отрезки графа пространственных данных. В ходе выполнения четвертого этапа методики необходимо оценить приемлемость воздушного пространства для пилотирования БВС, в настоящей работе оценка выполняется на основе риск-ориентированного подхода. На участках и в информационных единицах с переменным риском следует выполнить оценку в каждый интервал времени. Оценка заносится в поле «вес». На следующем этапе следует определить соотношение значимости для пользователя параметров весового значения и длины отрезков. На шестом этапе реализации методики следует применить инструмент вычисления оптимального маршрута. Необходимо вычислить несколько маршрутов перемещения между различными стартово-посадочными площадками в разные временные интервалы. В ходе последнего этапа методики следует оценить полученные результаты. Если вычисленные маршруты по каким-либо причинам не устраивают пользователя, следует провести

корректировку входных данных алгоритма вычисления оптимального маршрута, в том числе графа пространственных данных, а затем повторно вычислить несколько маршрутов перемещения.

Исходя из опыта построения геоинформационной модели сегмента воздушного пространства, изложенного в подглаве 4.2 работы, целесообразно выделить участки с постоянным и временным присутствием отрезков графа, с постоянным и переменным уровнем риска, разделяя их по разным шейп-файлам. Для каждого временного интервала на участке с переменным риском должна быть проведена оценка. Когда все поля слоев будут заполнены, полученные слои следует объединить в один шейп-файл, который используется в качестве входных данных для алгоритма вычисления оптимального маршрута БВС.

В ходе реализации методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов БВС гражданской авиации необходимо учитывать:

- географические условия, в том числе сезонные и суточные;
- требования нормативно-правовых актов и их изменение;
- распределение факторов опасности и их изменчивость;
- характеристики типа (модели) или единичного экземпляра БВС, а также их изменение по причине износа оборудования, ремонта;
- характеристики внешних пилотов (а также их изменчивость по различным причинам) как индивидуально, так и в составе экипажа;
- влияния специфики полетных заданий и индивидуальных особенностей эксплуатанта;
- невозможность учета недоступной информации.

Для реализации методики построения геоинформационной модели воздушного пространства, используемой для вычисления оптимальных маршрутов БВС гражданской авиации, следует учитывать следующие практические рекомендации:

- 1) для моделирования воздушного пространства необходим комплексный подход к учету и оценке тех аспектов данной системы, которые значимы для деятельности эксплуатанта БВС и решения конкретных задач,
- 2) требуется обязательный учет различных категорий ограничений в воздушном пространстве, в том числе обусловленных нормативно-правовыми актами различного уровня,
- 3) точность моделирования воздушного пространства должна быть достаточной для соблюдения требований к вычислению оптимальных маршрутов БВС, предъявляемых эксплуатантом,
- 4) целесообразно обобщать информацию об объекте моделирования, избыточность данных может привести к уменьшению скорости выполнения операций,
- 5) геоинформационная модель воздушного пространства или его сегмента имеет индивидуальный характер по причине наличия исключений для конкретного БВС из ограничений, установленных нормативно-правовыми актами, технических характеристик типа (модели) или единичного экземпляра БВС, оценки рисков применения БВС конкретным эксплуатантом,

## **Выводы по четвертой главе**

Критерии оптимальности маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения у пользователей могут различаться. В настоящей работе оптимальность полета из точки старта в точку назначения подразумевает компромисс между показателями эффективности расхода энергии и безопасностью полета в доступном воздушном пространстве, что выражается в минимальной сумме рисков выполнения полетного задания при соблюдении условия отсутствия

превышения общей протяженности маршрута полета над технической дальностью и продолжительностью полета БВС.

Для функционирования автоматизированного инструмента построения оптимальных маршрутов полетов БВС в среде полнофункциональной ГИС следует реализовать модель воздушного пространства в виде графа пространственных данных. Размеры отрезков графа необходимо выбрать и обосновать в соответствии с задачей, которую требуется решить, а также другими значимыми критериями: вычислительной мощностью имеющейся техники, требованиями к скорости решения задачи и другими.

Информационными единицами, применяемыми для моделирования воздушного пространства с целью вычисления оптимальных маршрутов перемещения БВС для последующей подачи документов в органы ЕС ОрВД, являются вертикальные и горизонтальные отрезки графа пространственных данных. Ситуационная составляющая, обобщенная с применением риск-ориентированного подхода, от которой зависит вес отрезка графа, играет роль контекста и является семантическим окружением информационной единицы. Изменение характеристик элементов модели воздушного пространства или процессов эксплуатанта БВС требует комплексного анализа. Создание модели воздушного пространства в виде взвешенного графа позволяет уменьшить сложность рабочей области за счет обобщения информации о семантическом окружении. Присвоение весовых значений отрезкам графа упрощает применение алгоритмов вычисления оптимального маршрута по причине обобщения информации о приемлемости выполнения полета БВС до количественного показателя. Модель воздушного пространства или его сегмента, реализованная в виде взвешенного графа, отражает онтологическое знание эксплуатанта в форме, пригодной для использования в вычислении оптимального маршрута перемещения БВС из точки старта в точку назначения. Реализация модели сегмента воздушного пространства над железнодорожной станцией Кинель и прилегающей территорией в виде графа пространственных данных в среде полнофункционального

бесплатного геоинформационного программного обеспечения, а также успешное применение скрипта, в основе которого лежит использование алгоритма Дейкстры для вычисления оптимальных маршрутов БВС свидетельствуют о том, что создание нового типа геоинформационной модели воздушного пространства доступно эксплуатантам БВС гражданской авиации, в том числе некрупным.

Для того, чтобы использовать разработанную методику выработки пространственно-содержательных рекомендаций по регулированию рисковой пространственной БВС-активности в части, касающейся построения оптимальных маршрутов перемещения из точки старта в точку назначения, сформулированы принципы и условия ее реализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования решена актуальная задача по разработке методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов БВС гражданской авиации, преодолена проблема обеспечения пространственными географическими данными деятельности эксплуатанта БВС гражданской авиации. По итогам проведенного исследования получены следующие результаты, имеющие значение для развития отрасли беспилотной гражданской авиации страны:

1. Разработан модельно-методический аппарат адекватного пространственно-временного представления, анализа и автоматизированного управления деятельностью авиационно-транспортной системы эксплуатанта БВС гражданской авиации, дополняющий существующую модель управления.
2. Разработана геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации.
3. Разработана методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработка пространственно-содержательных рекомендаций.
4. Разработанный модельно-методический аппарат направлен на регулирование рисковой БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации с целью повышения безопасности полетов и снижения издержек от выполнения перемещений по субоптимальным маршрутам.

Направления дальнейших исследований представляются на путях расширения ситуационных оценок геопространственных объектов, явлений и мероприятий для объектов авиационно-транспортной системы эксплуатанта БВС, а также наращивания взаимодействия систем планирования и управления деятельностью эксплуатанта БВС с системами получения информации о различных аспектах ситуационной составляющей воздушного пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анардович, С.С. Методы оценки рисков и прогнозирование сценариев развития чрезвычайных ситуаций при железнодорожных перевозках / С.С. Анардович, Е.А. Руш // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 1 (65). – С. 66–75.
2. Андреева, О.А. Геоинформационное проектирование трехмерных объектов / О. А. Андреева, С. Г. Дышленко // ИТНОУ: Инновационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 1 (11). – С. 39–46.
3. Андреева, О.А. Разработка методики геоинформационного моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта: дис... канд. техн. наук: 25.00.35 / Андреева Ольга Александровна. – М., 2021. – 218 с.
4. Атлас площадей прогнозирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aviametserver.ru/atlas/?ysclid=ma4cj79kb7169743928>.
5. Бельшева, Ю.В. Проблема оценки качества пространственно-временных данных, получаемых от системы метеорологических наблюдений / Ю.В. Бельшева, А.В. Матерухин // Приложение к журналу известия вузов. геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2020. – №11. – С.149-151.
6. Болбаков, Р.Г. Философия информационных единиц / Р.Г. Болбаков // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – №4. – С. 76–88.
7. Болелов, Э.А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения / Э.А. Болелов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – Том 21. – №5. – С.117-129.
8. Броневич, А.Г. Принятие решений, основанное на неточных вероятностях, и агрегирование источников информации / А.Г. Броневич, И.Н. Розенберг // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2023. – Т.18, №1. – С.5-27.

9. Булгаков, С.В. Геоинформационное моделирование: учебное пособие / С.В. Булгаков. – М.: МАКС Пресс, 2019. – 68с.
10. Булгаков, С.В. Информационное визуальное моделирование / С.В. Булгаков // Конструкторское бюро. – 2018. – 2 (133). – С.47-53.
11. Булгаков, С.В. Прикладная геоинформатика: учебное пособие / С.В. Булгаков. – М: МАКС Пресс, 2019. – 71 с.
12. Власова, Л.В. Геоинформационные аналитические модели комплексной оценки природных опасностей для Единой системы газоснабжения России / Л.В. Власова, Г.С. Ракитина, С.И. Долгов // Вести газовой науки. – 2017. – №1 (29). – С. 57–70.
13. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 №60-ФЗ [федер. закон: принят Гос. Думой 19 фев. 1997 г.: по состоянию на 21 апр. 2025 г.]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=483170&dst=0&rnd=17bZw#8rn8geUQVMln7P371>.
14. Горбунов, А.А. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала / А.А. Горбунов, А.Ф. Галимов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2016. – №2. – С.7-15.
15. Дегтярев, О.В. Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения / О.В. Дегтярев, И.Ф. Зубкова // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 62–76.
16. Дзюба, Ю.В. Информационные и геоинформационные методы оценки риска в транспортной сфере / Ю.В. Дзюба // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – №4. – С. 33–39.
17. Договор о принципах деятельности государств по исследованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела [федер. закон:

принят Гос. Думой 27 янв. 1967 г.]. [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://base.garant.ru/2540462/>.

18. Докукин, П.А. Графические информационные единицы / П.А. Докукин // Перспективы науки и образования. – 2015. – №3. – С.32-39.
19. Дулин, С.К. О многоуровневой онтологии геоданных / С.К. Дулин, С.В. Духин, В.Г. Поповидченко // Системы и средства информатики. – 2007. – Т.17, №1. – С.337- 354.
20. Дулин, С.К. О проблеме формирования геопространственных знаний в ГИС / С.К. Дулин, С.В. Духин, О.А. Терляков // Системы и средства информатики. – 2008. – Т.18, №1. – С.186-208.
21. Дышленко, С.Г. Маршрутизация в транспортных сетях / С.Г. Дышленко // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2018. – №1 (5). – С. 15–20.
22. Дышленко, С.Г. Модели построения маршрутов в транспортной сети / С.Г. Дышленко // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – №4 (8). – С.48-56.
23. Дышленко, С.Г. Ситуационный анализ в транспортной сети. / С.Г. Дышленко // Наука и технологии железных дорог – 2018. – Т.2, №1 (5). – С. 26–33.
24. Дышленко, С.Г. Сложные вычислительные системы / С.Г. Дышленко // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – №3. – С.53-58.
25. Дышленко, С.Г. Трехмерное моделирование в ГИС / С.Г. Дышленко // Перспективы науки и образования. – 2014. – №2 (8). – С. 28–33.
26. Дышленко, С.Г. Трехмерные информационные единицы. / С.Г. Дышленко // Перспективы науки и образования. – 2016. – №5 (23). – С. 15–19.
27. Загружаемые данные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.caiga.ru/dnload/>.
28. Зубков, Б.В. Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов:

монография / Б.В. Зубков, В.Д. Шаров. – М.: Моск. гос. технический ун-т ГА, 2010. – 196 с.

29. Иванов, С.А. Концепция построения цифрового двойника города / С.А. Иванов, К.Ю. Никольская, Г.И. Радченко, Л.Б. Соколинский, М.Л. Цымблер // Вестник ЮУрГУ. Вычислительная математика и информатика. – 2020. – Т.9, №4. – С. 5–23.
30. Калинин, Н.А. Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды / Н.А. Калинин, А.Л. Ветров, А.А. Смирнова // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2009. – Т. 151, № 4. – С.209-216.
31. Калинин, Н.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 8. – С. 53–60.
32. Калинин, Н.А. Численный анализ данных радиолокационных дистанционных измерений облачности / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 7. – С. 31–39.
33. Карпик, А.П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе: монография / А.П. Карпик, А.Г. Осипов, П.П. Мурзинцев. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 279 с.
34. Карта зон ограничений полетов для БВС – АВТМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://map.avtm.center>.
35. Костин, А.С. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения / А.С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2019. – №1(19) – с.70-80.
36. Кудж, С.А. Геоинформатика: монография / С.А. Кудж, В.Я. Цветков. – М.: Макс Пресс, 2019. – 223 с.
37. Кудж, С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем / С.А. Кудж // Перспективы науки и образования. – 2014. – №1. – С. 38–43.

38. Кудж, С.А. Транспортные онтологии / С.А. Кудж, Н.С. Курдюков // Мир транспорта. – 2024. – Т.22, №3 (112). – С. 6–11.
39. Кужелев, Г.П. Геоинформационные технологии в управлении транспортом / Г. П. Кужелев // Перспективы науки и образования. – 2014. – №4. – С.157-161.
40. Кужелев, П.Д. Пространственные знания для управления транспортом / П.Д. Кужелев // Государственный советник. – 2014. – №2. – С.17-22.
41. Кулагин, В.П. Геореференция в пространственных отношениях / В.П. Кулагин // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – №5 (17). – с.80-86.
42. Кулыгин, В.В. Совместное использование байесовских сетей и ГИС для оценки рисков штормовых нагонов в дельте р. Дон / В.В. Кулыгин // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, №2. – С. 92–107.
43. Куракина, Н.И. ГИС оценки влияния дорожного транспорта на шумовое загрязнение городских территорий / Н.И. Куракина, Р.А. Мышко, А.А. Турыгина // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 16–29.
44. Курлов, А.В. Анализ требований к качеству пространственно-временных данных в задачах территориального планирования / А.В. Курлов, А.В. Матерухин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66, №4. – С.59-68.
45. Лавренков, К.Е. Задача выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата при противодействующих, географических и погодных ограничениях в области полёта. / К.Е. Лавренков, А.П. Шевелёва, О.Т. Романов, М.Н. Машкин // Инновационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. – №4. – С.22-28.
46. Лебедев, С.А. Философия науки: словарь основных терминов. / С.А. Лебедев. – М.: Академический проект, 2004. – 320 с.
47. Левин, Б.А. Геоинформатика транспорта / Б.А. Левин, В.М. Круглов, С.И. Матвеев, В.Я. Цветков, В.А. Коугия. – М.: ВИНИТИ РАН, 2006. – 336 с.

48. Лисицкий, Д.В. Трехмерная компьютерная картография: монография / Д.В. Лисицкий, П.Ю. Бугаков, А.Т. Нгуен. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 178 с.
49. Лобатый, А.А. Формирование траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретных зон / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, А.М. Авсиевич // Системный анализ и прикладная информатика – 2021. – № 4. – С. 47–53.
50. Ложкин, В.Н. Применение геоинформационных систем для экологического контроля городского транспорта / В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина, А.Ю. Пенченков // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2016. – № 4. – С. 42–51.
51. Майоров, А.А. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике / А.А. Майоров, В.Я. Цветков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – №3. – с.87 -89.
52. Майоров, А.А. Пространственное когнитивное моделирование / А.А. Майоров // Перспективы науки и образования. – 2014. – №1 (7). – С. 33–37.
53. Майоров, А.А. Развитие информатики в научном направлении геоинформатика / А.А. Майоров // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 1 (2). – С. 42–57.
54. Майоров, А.А. Системный геоинформационный анализ / А.А. Майоров // Перспективы науки и образования. – 2014. – №4 (10). – С. 38–43.
55. Макаров, В.П. Разработка в авиакомпании системы менеджмента рисков в отношении безопасности полетов / В.П. Макаров // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – №68. – С.1-15.
56. Максимова, С.Е. Геоинформационное моделирование ограничений в воздушном пространстве Российской Федерации для полетов беспилотных воздушных судов / С.Е. Максимова, С.В. Духин // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «ГЕОФОРУМ. НИЖНИЙ НОВГОРОД». – 2024. – С. 124–127.

57. Максимова, С.Е. Геоинформационный подход к моделированию воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов гражданской авиации / С.Е. Максимова // Сборник материалов V Всероссийской Научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры». – СПб, 2024. – С.161-171.
58. Максимова, С.Е. Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям / С.Е. Максимова, С.В. Духин // Гидрометеорология и экология. – 2024. – № 77. – С. 739–749.
59. Максимова, С.Е. Геопорталы для планирования полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве Российской Федерации / С.Е. Максимова // Наука и технологии железных дорог – 2023. – №26. – С. 47–52.
60. Максимова, С.Е. Использование геоинформационных систем для оценки рисков применения беспилотных воздушных судов гражданской авиации / С.Е. Максимова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития информационных систем и технологий в современном обществе». – Орел, 2024. – С.257-261.
61. Максимова, С.Е. К вопросу о геоинформационном моделировании воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации / С.Е. Максимова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Образцовый маршрут». – Москва, 2024. – С.184-187.
62. Максимова, С.Е. Об актуальности применения геоинформационных технологий для построения оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов / С.Е. Максимова // Материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа». – Москва, 2024. – С.357-359.

63. Максимова, С.Е. Риск-ориентированное геоинформационное моделирование воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации / С.Е. Максимова // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2025. – Т. 28, №1. – С. 39–52.
64. Матвеев, С.И. Графы и навигация: научная монография. / С.И. Матвеев, И.Н. Розенберг. – М.: ВИНТИ РАН, 2011. – 196 с.
65. Матерухин, А.В. Имитационное моделирование потоков пространственно-временных данных для отладки алгоритмов диспетчеризации беспилотных воздушных судов / А.В. Матерухин, Я.Я. Месенгисер // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, №6. – С.692-699.
66. Махитько, В.П. Оценка рисков и факторов опасности в системе безопасности полетов воздушных судов / В.П. Махитько, Г.В. Дмитриенко, Е.А. Гаврилова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т.19, № 4 (2). – С. 192–197.
67. Мельник, Д.М. Взаимосвязь уровня рисков и уровня качества процессов в авиационном предприятии / Д.М. Мельник // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 6 (79). – С. 35–39.
68. Михеев, В. Л., Биденко С.И., Храмов, И.С. и др. Геоконтроллинг рисковой территориальной активности / под ред. Проф. С.И. Биденко. – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – 263 с.
69. Небосвод УTM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skyarc.ru>.
70. Ожерельева, Т.А. Информационные ресурсы: монография / Т.А. Ожерельева – М.: Макс Пресс, 2022. – 54 с.
71. Полетные планы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fpln.ru/>.

72. Попов, А.С. Методы, математические модели и комплекс программ для выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования: дис. ... канд. техн. наук: 1.2.2. / Попов Андрей Сергеевич – М., 2022. – 168 с.

73. Постановление Правительства Российской Федерации «О Единой системе организации воздушного движения Российской Федерации» от 28 августа 2015 г. № 901 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=185262&cacheid=786D7045E7A65D85FC488F07AA0E7D92&mode=splus&rnd=l7bZw#VeV6geUV4wVXAxj5>.

74. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» от 11 марта 2010 г. №138 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=474010&dst=1000000001&cacheid=E4D12FC769F6070F133D20E93B961A42&mode=splus&rnd=l7bZw#VHz6geUKsXJ81qVN1>.

75. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об установлении запретных зон» от 11 мая 2022 г. № 172 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=484938&cacheid=4C627D4DB7CE098FB22FE5EE40CD9CA0&mode=splus&rnd=kmbfbkeUT7039ZguK#GO0hkeUITgtQPL7M1>.

76. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об установлении зон полетов беспилотных воздушных судов» от 8 июля 2024 г. № 236 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=483945&cacheid=5490E3BBB1F1D11E412E465C22FD8954&mode=splus&rnd=VB7YrhUKe44e7Jd71#jOkRshUmgEH2WDad1>.

77. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об установлении постоянных зон ограничения полетов и временных зарезервированных зон ограничения полетов» от 11 мая 2022 г. № 173 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=483946&cacheid=5490E3BBB1F1D11E412E465C22FD8955&mode=splus&rnd=VB7YrhUKe44e7Jd71#jOkRshUmgEH2WDad2>.

[cgi?req=doc&base=LAW&n=494284&cacheid=252DC1FEADFF715A469A5227EF81716F&mode=splus&rnd=kmfbkeUT7039ZguK#z7PikeUYdJvGwbXu](https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=494284&cacheid=252DC1FEADFF715A469A5227EF81716F&mode=splus&rnd=kmfbkeUT7039ZguK#z7PikeUYdJvGwbXu).

78. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об установлении постоянных опасных зон» от 11 мая 2022 г. № 171 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=419409&cacheid=5110AAA6A88B3EC4EB1EC3901F715575&mode=splus&rnd=kmfbkeUT7039ZguK#jhuhkeUewfRNh6ut>.

79. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении границ зон (районов) единой системы организации воздушного движения Российской Федерации, границ районов аэродромов (аэроузлов, вертодромов), границ классов А и С воздушного пространства» от 23 июля 2020 г. № 248 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=463626&cacheid=350E237E6435F7FF9D2987959C11B6F5&mode=splus&rnd=kmfbkeUT7039ZguK#DkOjkeUIFdi3YoeQ2>.

80. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении инструкции по разработке, установлению, введению и снятию временного и местного режимов, а также кратковременных ограничений» от 27 июня 2011 г. №171 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=280237&dst=1000000001&cacheid=E684CDEB367D99CFAF2CBE736EF1DA9A&mode=splus&rnd=dXvBkeUduAo4cGA9#umuMkeUYImRBfKcN>.

81. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении табеля сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации» от 24 января 2013 г. №13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=316767&cacheid=B98E0D4AE8424F72943174C29A251BDA&mode=splus&rnd=vITNgeUc7aK0aoH1#pUFxjeU2h1J6IkX2>.

82. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Организация воздушного

движения в Российской Федерации» от 25 ноября 2011 г. № 293 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=213962&cacheid9E4187E1CF9E1B9185B9F427DE88CD2D&mode=splus&rnd=kmfbkeUT7039ZguK#QN0nkeUsj4MxZdhz>.

83. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» от 3 марта 2014 г. № 60 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consweb.vniias.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=169199&dst=100000001&cacheid=46B8BF4BDE833A3278CBE0CE7C0263AE&mode=splus&rnd=6o2KmfUgRVwqYJjn#Tjp0ufUuwM1lZcy5>.

84. Приложения 3 к Конвенции о международной гражданской авиации «Метеорологическое обеспечение международной авиации». – 19-е изд. – ИКАО, 2018. – 230 с.

85. Просвирина, Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов / Н.В. Просвирина // Московский экономический журнал. – 2021. – №10. – С. 560–575.

86. Розенберг, И.Н. Выбор технологических решений для поддержки процесса синтеза геоданных инфраструктуры железнодорожного транспорта / И.Н. Розенберг, С.К. Дулин // Системы и средства информатики. – 2023. – Т.33, №2. – С.46–59.

87. Розенберг, И.Н. Геоинформационное моделирование как фундаментальный метод познания / И.Н. Розенберг // Перспективы науки и образования. – 2016. – №3. – С.12-15.

88. Розенберг, И.Н. Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами: монография / И.Н. Розенберг, С.Л. Беляков, А.В. Боженюк [и др.]; под редакцией И. Н. Розенberга. – М.: ВИНИТИ РАН, 2019. – 289 с.

89. Розенберг, И.Н. Методы и средства образного представления знаний для принятия решений с использованием геоинформационных систем / И.Н. Розенберг, С.Л. Беляков // Труды третьей научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2015». – М., 2014. – С.157-160.
90. Розенберг, И.Н. Моделирование семантики в структуре геоинтероперабельности / И.Н. Розенберг, С.К. Дулин // Труды четвертой научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2015». – М., 2015. – С.113-117.
91. Розенберг, И.Н. Онтологический подход в геоинформатике / И. Н. Розенберг // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – №5 (17). – С. 86–95.
92. Розенберг, И.Н. Основы геоинформационного моделирования: учебник в двух книгах / И.Н. Розенберг, С.Л. Беляков, А.В. Боженюк; под редакцией И.Н. Розенберга. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2022. – Кн. 1. – 310 с.
93. Рубцов, Е.А. Анализ использования общего воздушного пространства и захода на посадку при использовании параллельных взлетно-посадочных полос pilotируемыми и беспилотными воздушными судами / Е.А. Рубцов, С.А. Кудряков, В.В. Романцев, С.А. Беляев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – №4. – С. 13–19.
94. Рыбалкина, А.Л. Методика оценки рисков предстоящего полета для вертолетов с учетом неблагоприятных метеоусловий / А.Л. Рыбалкина, Е.И. Трусова, В.Д. Шаров // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 124–140.

95. Савиных, В.П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях / В.П. Савиных // Прикладная геоинформатика. – 2017. – № 3 (20). – С. 109–117.
96. Самков, Б.М. Организация потоков, планирование и обеспечение воздушного движения: учебное пособие / Б.М. Самков, В.А. Солодухин. – Санкт-Петербург: СПбГУ ГА, 2008. – 152с.
97. Система предоставления планов полетов по сети Интернет: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sppi.ivprf.ru>.
98. Трубаков, Е.О. Математическое моделирование процесса перемещения мобильных объектов в транспортных сетях для задач планирования оптимального маршрута движения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Трубаков Евгений Олегович. – Брянск, 2015. – 155 с.
99. Фалейчик, Л.М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов / Л.М. Фалейчик // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 2. – С.14-24.
100. Фаттахов, М.Р. Рынок беспилотных авиационных систем в России: состояние и особенности функционирования в макроэкономических условиях 2022 года / М.Р. Фаттахов, А.В. Киреев, В.С. Клещ // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12., № 4. – С. 2507–2528.
101. Цветков, В.Я. Виды пространственных отношений / В.Я. Цветков // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 5. – с.138-140.
102. Цветков, В.Я. Геостатистика / В.Я. Цветков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – №3. – С.174-184.
103. Цветков, В.Я. Геостатистика как инструмент управления / В.Я. Цветков, О.В. Зайцева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – №5. – С.134-137.
104. Цветков, В.Я. Информационное пространственное моделирование: учебник / В.Я. Цветков, И.И. Лонский, С.В. Булгаков; Московский

государственный университет геодезии и картографии. – М.: МАКС Пресс, 2022. – 245 с.

105. Цветков, В.Я. Информационные единицы как средство построения картины мира / В.Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 – С. 36–40.

106. Цветков, В.Я. Логистическая геоинформатика: монография / В.Я. Цветков, С.В. Булгаков. – М.: МАКС Пресс, 2023. – 189 с.

107. Цветков, В.Я. О пространственных и экономических отношениях / В.Я. Цветков // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – №3. – с.115-117.

108. Цветков, В.Я. Общая и прикладная геоинформатика: учебник / В.Я. Цветков, И.И. Лонский, С.В. Булгаков. – М.: Макс Пресс, 2021. – 197 с.

109. Цветков, В.Я. Пространственные отношения в геоинформатике. / В.Я. Цветков // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». – 2012. – №1. – С.59-61.

110. Шаров, В.Д. К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем / В.Д. Шаров, В.Л. Кузнецов, П.М. Поляков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2022. – Т. 25, № 6. – С. 62–75.

111. Шаров, В.Д. Об управлении безопасностью полетов при эксплуатации беспилотных авиационных систем / В.Д. Шаров, Б.П. Елисеев, П.М. Поляков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 42–56.

112. Юсупова, Н.И. Модели, методы и инструменты при создании цифровых двойников. – М.: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – 123с.

113. Ядровская, М.В. К вопросу о компьютерном моделировании / М.В. Ядровская // Advanced Engineering Research. – 2020. – Т.20, №3. – С. 332–345.

114. Ядровская, М.В. Средства моделирования в обучении / М.В. Ядровская // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2020. – Т.20, №3. – С. 332–345.
115. Doc 10004: Глобальный план обеспечения безопасности полетов. – ИКАО, 2022. – 58 с.
116. Doc 7300/9: Конвенция о международной гражданской авиации [заключена в г. Чикаго 07.12.1944 (с изм. и доп., вступившими в силу на 01.01.2000)]. – ИКАО, 2006. – 114 с.
117. Doc 9750: Глобальный аeronавигационный план. – ИКАО, 2019. – 140 с.
118. Doc 9859: Руководство по управлению безопасностью полетов. – ИКАО, 2018. – 218 с.
119. Flydrone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flydrone.ru/>.
120. Barrado, C. U-Space Concept of Operations: A Key Enabler for Opening Airspace to Emerging Low-Altitude Operations / C. Barrado, M. Boyero, L. Brucculeri, G. Ferrara, A. Hately, P. Hullah, D.M. Marrero, E. Pastor, A. Rushton, A. Volkert, – Aerospace, 2020, – Vol. 7. – № 3. – pp. 24.
121. Capitan, C. Unmanned Aerial Traffic Management System Architecture for U-Space In-Flight Services / C. Capitan, H. Perez-Leon, J. Capitan, A. Castano, A. Ollero. – Applied science, 2021. – Vol. 11. – № 9. – 3995.
122. Chang, S. A GIS Model for Analyzing Airspace Obstructions and Safety near Airports / S. Chang // Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2016. – №10. – pp. 553 – 562.
123. Goodchild, M. F. NextGeneration Digital Earth / M.F. Goodchild, H. Guo, A. Annoni, L. Bian, K.D. Bie, F. Campbell, M. Craglia, M. Ehlers, J.V. Genderen, D. Jackson // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2012. – 109.28. – pp. 11088–11094.

124. Han, B. Emergency Airport Site Selection Using Global Subdivision Grids / B. Han, T. Qu, Z. Huang, Q. Wang, X. Pan // Big Earth Data. – 2022. – № 6.3. – pp. 276–293.
125. Harris, A. The need for air space and outer space demarcation/ A. Harris, R. Harris. – Space Policy. – 2006. – Vol. 22. – № 1. – pp. 3-7.
126. He, H. Data-Driven Insights into Population Exposure Risks: Towards Sustainable and Safe Urban Airspace Utilization by Unmanned Aerial Systems / H. He, X. Liao, H. Ye, C. Xu, H. Yue // Sustainability. – 2023. – № 15. – 12247.
127. Inanloo, B. A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks / B. Inanloo, B. Tansel, K. Shams, X. Jinb, A. Gan // Safety Science. – 2016. – №84. – pp. 57–66.
128. Jiang, T. Unmanned Aircraft System traffic management: Concept of operation and system architecture/ T. Jiang, J. Geller, D. Ni, J. Collura // International Journal of Transportation Science and Technology, 2016. – № 5. – pp. 123-135.
129. Jung, K. UTM Architecture and Flight Demonstration in Korea/ K. Jung, S. Kim, B. Jung, H. Kang, C. Kang. – Aerospace, 2022 – Vol. 9. – №. 650. – pp. 1-20.
130. Litsheim, S. Airport Obstacle Surfaces / S. Litsheim, X. Xiao // Journal of Advanced Transportation. – 2009. – № 43. – pp. 347-366.
131. Neelakandan, D. S. Enhancing Trajectory-Based Operations for UAVs through Hexagonal Grid Indexing: A Step towards 4D Integration of UTM and ATM / D.S. Neelakandan, H.A. Ali // International Journal of Aviation, Aeronautics and Aerospace. – 2023. – №10.2. – pp.1-21.
132. Omachi, T. A GIS-based risk assessment of hydrogen transport: Case study in Yokohama City / T. Omachi, H. Seya, M. Fuse // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46. – № 23. –pp.12420–12428.
133. Primatesta, S. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments / S. Primatesta, A. Rizzo, A. Cour-Harbo // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2019. – Vol. 97. – pp.489– 509.

134. Rienecker, H. Energy optimal 3D fight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments / H. Rienecker, V. Hildebrand, H. Pfifer // CEAS Aeronautical Journal. – 2023. – Vol. 14. – P. 621–636.
135. Shrestha, R. A Survey on Operation Concept, Advancements, and Challenging Issues of Urban Air Traffic Management / R. Shrestha, I. Oh, S. Kim // Frontiers in Future Transportation, 2021. – Vol. 2 – pp. 626935.
136. Susini, A. Assessment of aircraft accident probability on industrial facilities by means of GIS risk-register, the examples of Geneva / A. Susini, C. Hurzeler, A. Schonenberger, A. Massot, H. Fricke, N. Gronak, C. Thiel, D. Fiedler // Proceedings of the EnviroInfo 2008 Conference. – Luneburg, 2008. – pp. 466–475.
137. Tang, H. UAV path planning based on third-party risk modeling / H. Tang, Q. Zhu, B. Qin, R. Song, Z. Li // Scientific Reports. 2023. – № 13. – pp.1-20.
138. Tsvetkov, V. Ya. Semantic environment of information units / V. Ya. Tsvetkov // European researcher. Series A. 2014. –Vol. (76). – № 6-1. – p. 1059-1065
139. Vincent-Boulay, N. Geospatial Approach to Modeling Airspace Risk Factors / N. Vincent-Boulay, C. A. Marsden, E. Fernandes, C. Verdonk, F. Netyasov // Journal of Open Aviation Science. – 2025. – Vol. 3, №1. – pp. 1-22.
140. Von Neuman, J. Theory of games and economic behavior / J. Von Neuman, O. Morgenstern // Princeton university press, Princeton. – NJ, 1944. – 641 p.
141. Yin, S. An Enhanced Whale Algorithm for Three-Dimensional Path Planning for Meteorological Detection of the Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments / S. Yin, J. Yang, L. Ma, M. Fu, K. Xu// IEEE Access. – 2024. – № 12. – pp. 60039–60057.
142. Zhang, B. Probabilistic planning and risk evaluation based on ensemble weather forecasting / B. Zhang, L. Tang, M. Roemer // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2018. – Vol. 15. – № 2. – Pp. 556–566.
143. Zhang, B. Probabilistic Weather Forecasting Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning / B. Zhang, L. Tang, M. Roemer // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. – V. 37. – P. 309–312.

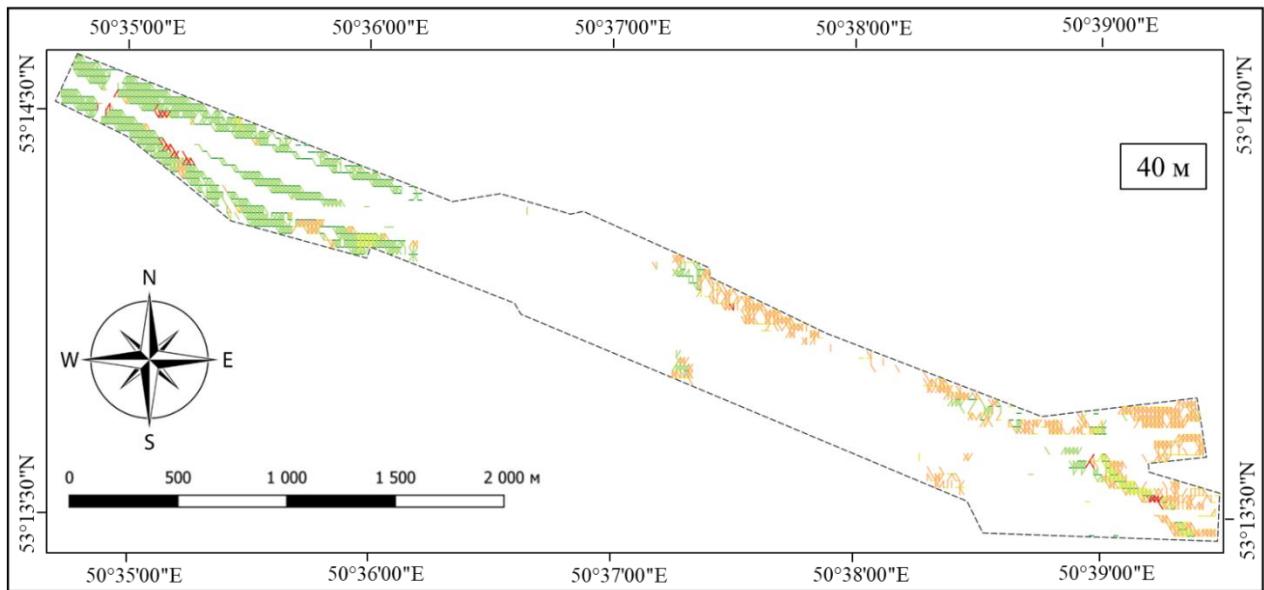
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

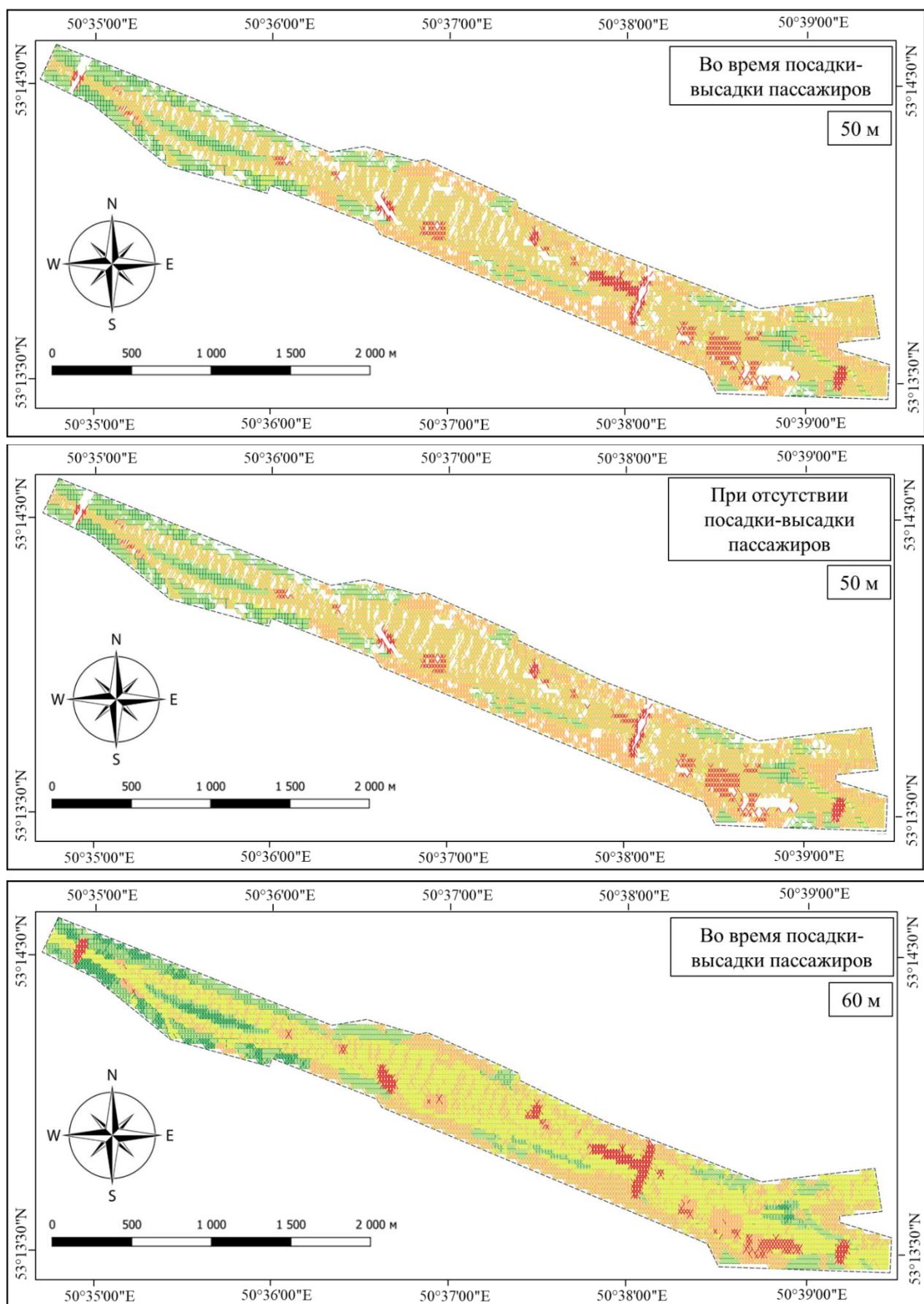
Горизонтальные отрезки риск-ориентированной модели  
сегмента воздушного пространства над территорией железнодорожной  
станции Кинель и прилегающей местностью

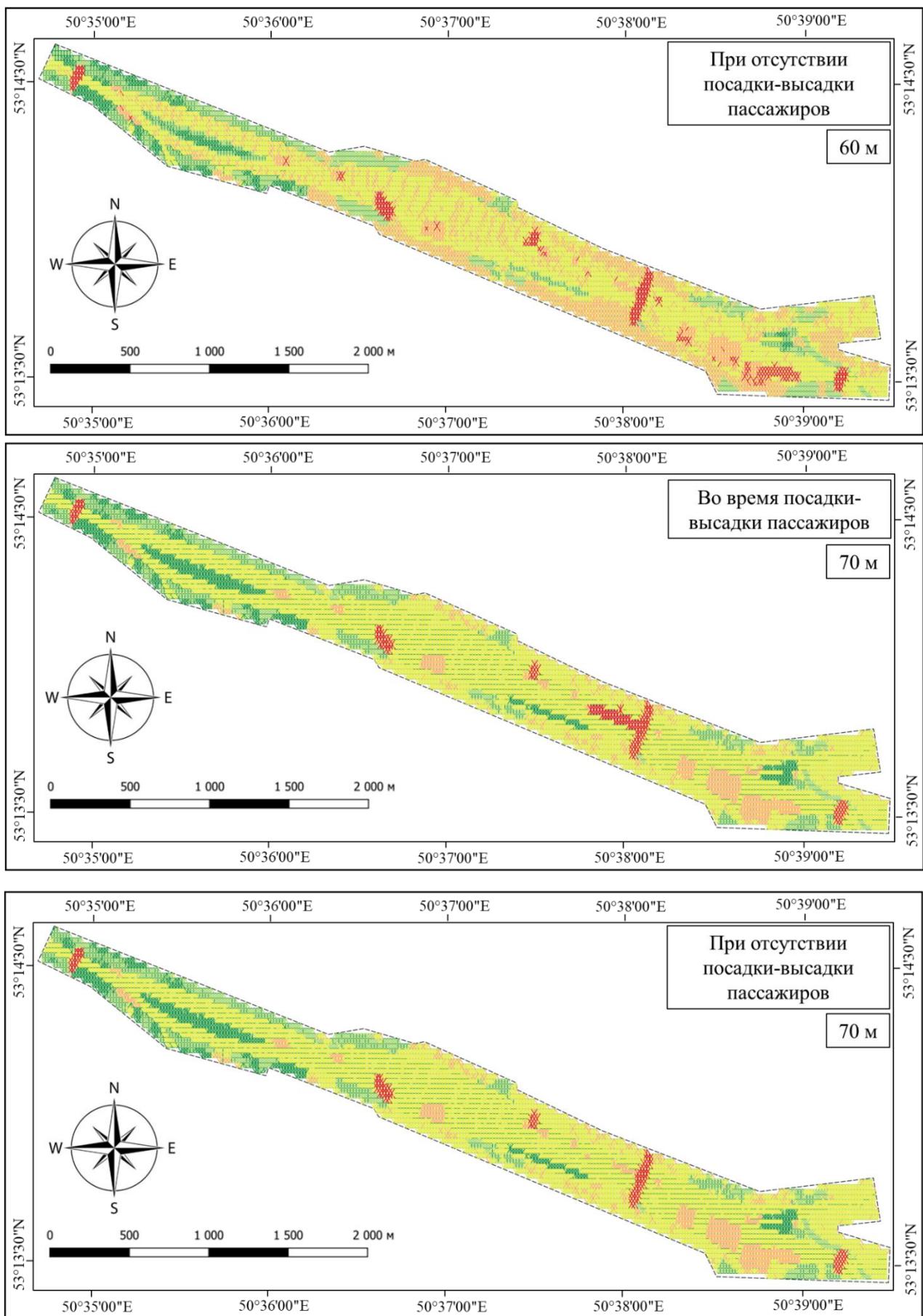
### Условные обозначения

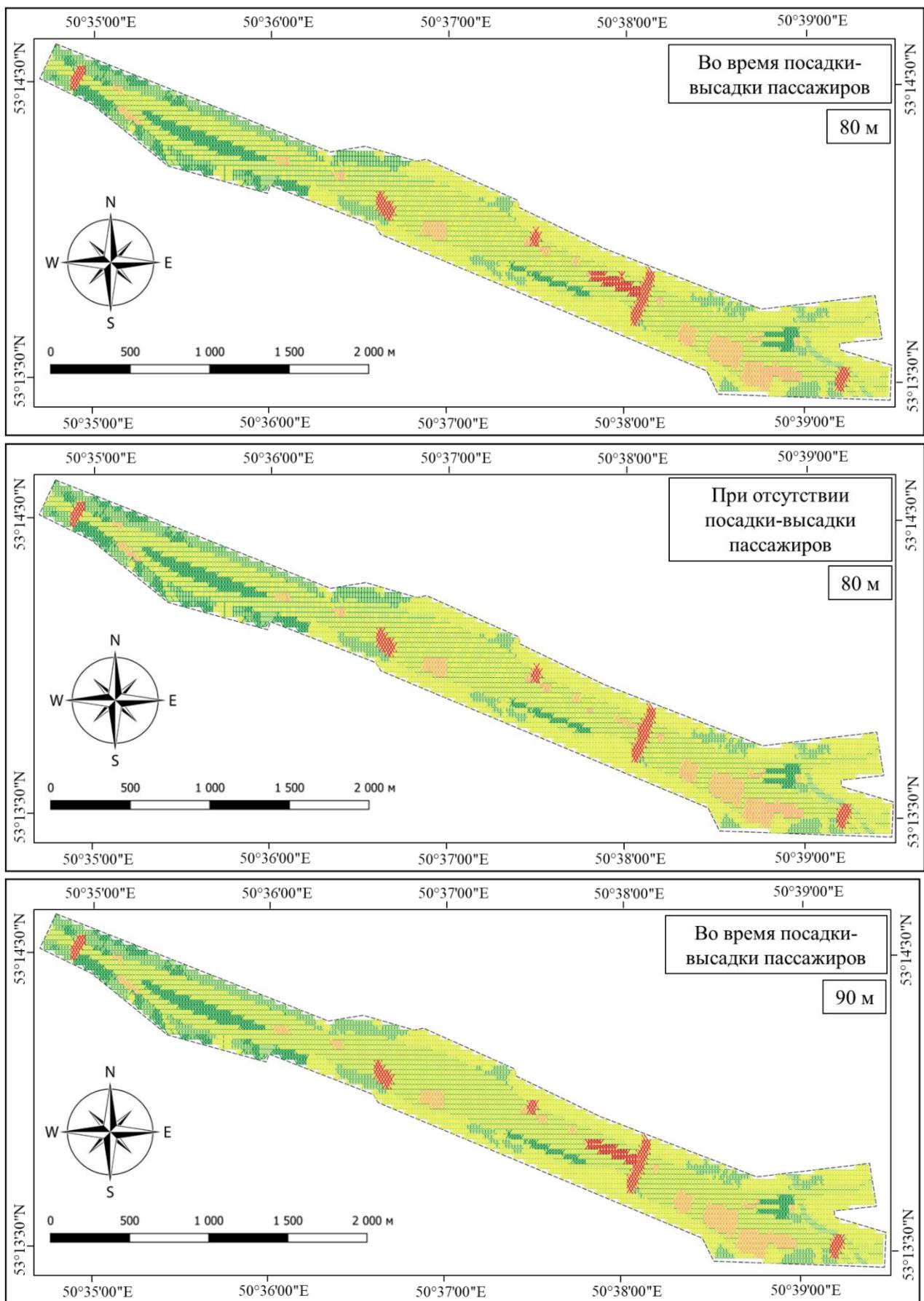
Вес отрезков, балл

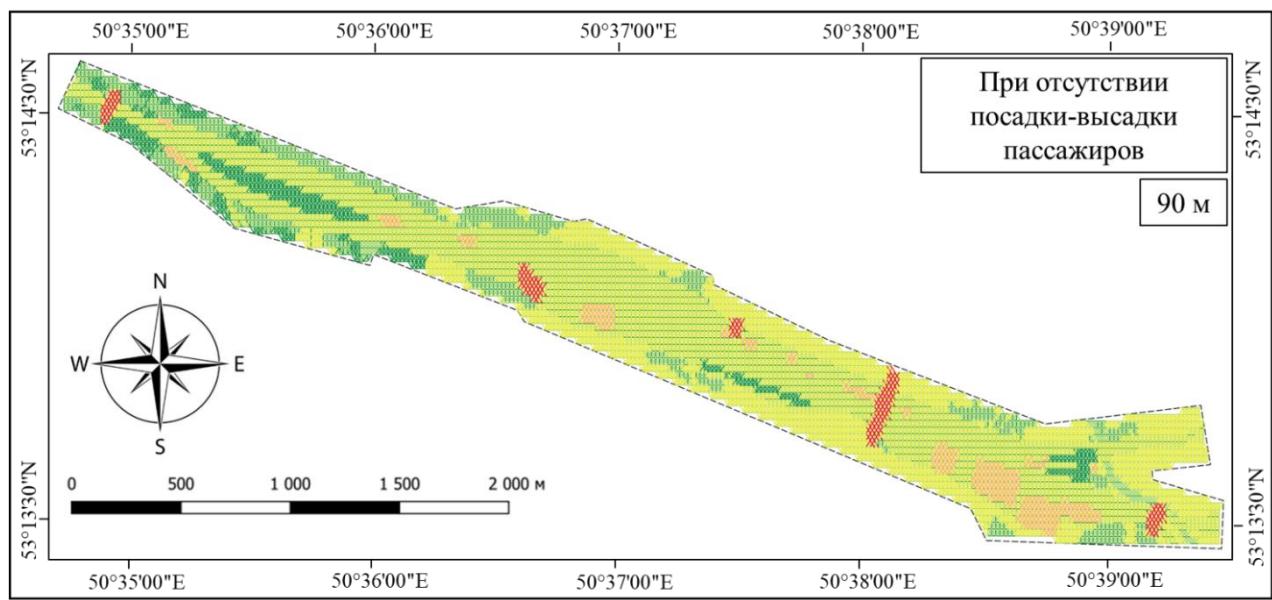
<span style="color: green;">—</span>	1,00 – 3,50	60 м	высота отрезков графа (абс.)
<span style="color: green;">—</span>	3,51 – 5,50		
<span style="color: yellow;">—</span>	5,51 – 8,50	—	граница модели сегмента воздушного пространства
<span style="color: brown;">—</span>	8,51 – 12,00		
<span style="color: red;">—</span>	12,01 – 22,70	—	











## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Исходные коды программ на языке программирования Python  
для геоинформационного моделирования воздушного пространства и  
вычисления оптимального маршрута беспилотного воздушного судна в среде  
QGIS**

Исходный код программы на языке программирования Python для создания  
отрезков графа пространственных данных для моделирования сегмента  
воздушного пространства

```

from qgis.core import *
import os
import math

# Конфигурационные параметры
input_shapefile = "D:/Новая папка/4 точки/4 точки.shp" # Путь до папки содержащей 4
точки.
save_method = 'memory'                                     # Варианты метода соохранения: 'memory'
(временный слой) или 'shapefile' (файл)
output_path = "D:/Новая папка/Результаты/сетка.shp"      # Путь для сохранения результата.
(Файла с названием "сетка.shp" в директории существовать НЕ ДОЛЖНО).
grid_step_north_south = 1/3600                            # Шаг с севера на юг (1/3600 = 1 секунда)
grid_step_west_east = 1/3600                             # Шаг с запада на восток (1/3600 = 1 секунда)
n_layers = 6                                              # Количество горизонтальных слоев графа.
base_height = 0.0                                         # Высота первого слоя
height_step = 10.0                                         # Шаг высоты между слоями
vertical_step_seconds = 0.001   # Вертикальный отступ между слоями. (задавать в секундах)
vertical_step_degrees = vertical_step_seconds / 3600
add_diagonals = 1                                         # Добавление диагоналей в горизонтальных слоях.
(1 - добавлять, 0 - не добавлять)
add_points = 0                                            # Добавление точек в граф. (1 - добавлять, 0 - не добавлять)
add_inclined_diagonals = 1                                # Добавление наклонных диагоналей. (1 - добавлять,
0 - не добавлять)

def main():
    rectangle_points = []
    input_layer = QgsVectorLayer(input_shapefile, "input_points", "ogr")
    if not input_layer.isValid():
        print("ОШИБКА: Не удалось загрузить слой")
    return

```

```

for feature in input_layer.getFeatures():
    point = feature.geometry().asPoint()
    rectangle_points.append((point.x(), point.y()))

if len(rectangle_points) != 4:
    print("ОШИБКА: Файл должен содержать ровно 4 точки")
    return

crs = input_layer.crs().authid()
# Поиск границ
xs = [p[0] for p in rectangle_points]
ys = [p[1] for p in rectangle_points]
min_x, max_x = min(xs), max(xs)
min_y, max_y = min(ys), max(ys)

# Генерация точек
x_steps = int((max_x - min_x) / grid_step_west_east) + 1
y_steps = int((max_y - min_y) / grid_step_north_south ) + 1
layers = []

for layer_idx in range(n_layers):
    # Вычисляем высоту слоя
    layer_z = base_height + layer_idx * height_step
    # Равномерное смещение на северо-восток
    shift = layer_idx * vertical_step_degrees
    x_shift = shift / math.sqrt(2)
    y_shift = shift / math.sqrt(2)
    grid_points = []
    all_points = []

    for i in range(y_steps):
        row = []
        for j in range(x_steps):
            x = min_x + j * grid_step_west_east + x_shift
            y = min_y + i * grid_step_north_south + y_shift
            pt = (x, y)
            row.append(pt)
            all_points.append((x, y, layer_z))
        grid_points.append(row)

    layers.append({
        'z': layer_z,
        'grid_points': grid_points,
        'all_points': all_points
    })

segments = []

# Связи внутри каждого слоя

```

```

for layer_data in layers:
    grid_points = layer_data['grid_points']
    layer_z = layer_data['z']

    # Горизонтальные связи
    for i in range(len(grid_points)):
        for j in range(len(grid_points[i]) - 1):
            start = grid_points[i][j]
            end = grid_points[i][j+1]
            segments.append((start, end, "горизонтальный", layer_z))

    # Вертикальные связи внутри слоя
    for i in range(len(grid_points) - 1):
        for j in range(len(grid_points[i])):
            start = grid_points[i][j]
            end = grid_points[i+1][j]
            segments.append((start, end, "горизонтальный", layer_z))

    # Диагональные связи
    if add_diagonals == 1:
        for i in range(len(grid_points) - 1):
            for j in range(len(grid_points[i]) - 1):
                lb = grid_points[i][j]
                rt = grid_points[i+1][j+1]
                segments.append((lb, rt, "горизонтальный_диагональный", layer_z))

                rb = grid_points[i][j+1]
                lt = grid_points[i+1][j]
                segments.append((rb, lt, "горизонтальный_диагональный", layer_z))

    # Вертикальные связи между слоями
    for layer_idx in range(len(layers) - 1):
        current_layer = layers[layer_idx]
        next_layer = layers[layer_idx + 1]
        current_z = current_layer['z']
        next_z = next_layer['z']

        for i in range(len(current_layer['grid_points'])):
            for j in range(len(current_layer['grid_points'][i])):
                start = current_layer['grid_points'][i][j]
                end = next_layer['grid_points'][i][j]
                segments.append((start, end, "вертикальный", f'{current_z}-{next_z}'))

    if add_inclined_diagonals == 1:
        created_diagonals = set()

        for layer_idx in range(len(layers) - 1):
            current_layer = layers[layer_idx]
            next_layer = layers[layer_idx + 1]
            current_z = current_layer['z']

```

```

next_z = next_layer['z']
grid_current = current_layer['grid_points']
grid_next = next_layer['grid_points']

rows = len(grid_current)
cols = len(grid_current[0]) if rows > 0 else 0

# Генерация диагоналей для каждого куба
for i in range(rows - 1):
    for j in range(cols - 1):
        # Точки текущего слоя
        A = grid_current[i][j]
        B = grid_current[i][j+1]
        C = grid_current[i+1][j+1]
        D = grid_current[i+1][j]

        # Точки следующего слоя
        A1 = grid_next[i][j]
        B1 = grid_next[i][j+1]
        C1 = grid_next[i+1][j+1]
        D1 = grid_next[i+1][j]

        spatial_diagonals = [
            (A, C1), (B, D1), (C, A1), (D, B1)
        ]

        for diag in spatial_diagonals:
            key = tuple(sorted([diag[0], diag[1]]), key=lambda pt: (pt[0], pt[1])))
            if key not in created_diagonals:
                segments.append((diag[0], diag[1], "наклонный", f'{current_z}-{next_z}'))
                created_diagonals.add(key)

        # Боковые диагонали
        side_diagonals = [
            (A, B1), (B, A1), (B, C1), (C, B1),
            (C, D1), (D, C1), (D, A1), (A, D1)
        ]

        for diag in side_diagonals:
            key = tuple(sorted([diag[0], diag[1]]), key=lambda pt: (pt[0], pt[1])))
            if key not in created_diagonals:
                segments.append((diag[0], diag[1], "диагональный", f'{current_z}-'
{next_z}"))
                created_diagonals.add(key)

    save_grid(segments, crs, save_method, output_path)

if add_points == 1:
    all_points = []
    for layer_data in layers:

```

```

    all_points.extend(layer_data['all_points'])
    save_points(all_points, crs, save_method, output_path)

def save_points(points, crs, method, output_path=None):
    fields = QgsFields()
    fields.append(QgsField("ID", QVariant.Int))
    fields.append(QgsField("z", QVariant.Double))

    if method == 'memory':
        point_layer = QgsVectorLayer(f'Point?crs={crs}', "grid_points", "memory")
        pr = point_layer.dataProvider()
        pr.addAttribute(fields)
        point_layer.updateFields()

        features = []
        point_id = 0

        for pt in points:
            x, y, z_value = pt
            feature = QgsFeature()
            point = QgsGeometry.fromPointXY(QgsPointXY(x, y))
            feature.setGeometry(point)
            feature.setAttributes([point_id, z_value])
            features.append(feature)
            point_id += 1

        pr.addFeatures(features)
        point_layer.updateExtents()
        QgsProject.instance().addMapLayer(point_layer)
        print("Точки сетки сохранены во временный слой 'grid_points'")
        return True

    elif method == 'shapefile':
        base_path = os.path.splitext(output_path)[0]
        points_output_path = f'{base_path}_points.shp'

        options = QgsVectorFileWriter.SaveVectorOptions()
        options.driverName = "ESRI Shapefile"
        options.fileEncoding = "UTF-8"

        os.makedirs(os.path.dirname(points_output_path), exist_ok=True)

        writer = QgsVectorFileWriter.create(
            points_output_path,
            fields,
            QgsWkbTypes.Point,
            QgsCoordinateReferenceSystem(crs),
            QgsProject.instance().transformContext(),
            options
        )

```

```

if writer.hasError() != QgsVectorFileWriter.NoError:
    print(f"Ошибка при сохранении точек: {writer.errorMessage()}")
    return False
    point_id = 0
for pt in points:
    x, y, z_value = pt
    feature = QgsFeature(fields)
    point = QgsGeometry.fromPointXY(QgsPointXY(x, y))
    feature.setGeometry(point)
    feature.setAttributes([point_id, z_value])
    writer.addFeature(feature)
    point_id += 1

del writer

layer_name = os.path.splitext(os.path.basename(points_output_path))[0]
existing_layers = QgsProject.instance().mapLayersByName(layer_name)
if existing_layers:
    QgsProject.instance().removeMapLayer(existing_layers[0])

layer = QgsVectorLayer(points_output_path, layer_name, "ogr")
QgsProject.instance().addMapLayer(layer)
print(f"Точки сетки сохранены в файле: {points_output_path}")
return True

else:
    print(f"Неизвестный метод сохранения: {method}")
    return False

def save_grid(segments, crs, method, output_path=None):
    fields = QgsFields()
    fields.append(QgsField("длина", QVariant.Double, prec=2))
    fields.append(QgsField("z", QVariant.String))
    fields.append(QgsField("тип", QVariant.String))
    fields.append(QgsField("ID", QVariant.Int))
    fields.append(QgsField("вес", QVariant.Double, prec=2))
    fields.append(QgsField("вр_на?", QVariant.String))
    fields.append(QgsField("продо", QVariant.String))

    if method == 'memory':
        line_layer = QgsVectorLayer(f"LineString?crs={crs}", "grid_lines", "memory")
        pr = line_layer.dataProvider()
        pr.addAttribute(fields)
        line_layer.updateFields()

        features = []
        segment_id = 0

        for segment in segments:

```

```

start, end, seg_type, z_value = segment
feature = QgsFeature()
line = QgsGeometry.fromPolylineXY([
    QgsPointXY(start[0], start[1]),
    QgsPointXY(end[0], end[1])
])
feature.setGeometry(line)

feature.setAttributes([
    None,
    str(z_value),
    seg_type,
    segment_id,
    None,
    "00:00",
    "23:59"
])

features.append(feature)
segment_id += 1

pr.addFeatures(features)
line_layer.updateExtents()
QgsProject.instance().addMapLayer(line_layer)
print("Сетка сохранена во временный слой 'grid_lines'")
return True

elif method == 'shapefile':
    options = QgsVectorFileWriter.SaveVectorOptions()
    options.driverName = "ESRI Shapefile"
    options.fileEncoding = "UTF-8"

    os.makedirs(os.path.dirname(output_path), exist_ok=True)

    writer = QgsVectorFileWriter.create(
        output_path,
        fields,
        QgsWkbTypes.LineString,
        QgsCoordinateReferenceSystem(crs),
        QgsProject.instance().transformContext(),
        options
    )

    if writer.hasError() != QgsVectorFileWriter.NoError:
        print(f"Ошибка: {writer.errorMessage()}")
        return False

    segment_id = 0

    for segment in segments:

```

```

start, end, seg_type, z_value = segment
feature = QgsFeature(fields)
line = QgsGeometry.fromPolylineXY([
    QgsPointXY(start[0], start[1]),
    QgsPointXY(end[0], end[1])
])
feature.setGeometry(line)

feature.setAttributes([
    None,
    str(z_value),
    seg_type,
    segment_id,
    None,
    "00:00",
    "23:59"
])

writer.addFeature(feature)
segment_id += 1

del writer
layer_name = os.path.splitext(os.path.basename(output_path))[0]
existing_layers = QgsProject.instance().mapLayersByName(layer_name)
if existing_layers:
    QgsProject.instance().removeMapLayer(existing_layers[0])

layer = QgsVectorLayer(output_path, layer_name, "ogr")
QgsProject.instance().addMapLayer(layer)
print(f"Сетка сохранена в файл: {output_path}")
return True

else:
    print(f"Неизвестный метод сохранения: {method}")
    return False

main()

```

Исходный код программы на языке программирования Python для вычисления маршрута беспилотного воздушного судна из точки старта в точку назначения

```

from qgis.core import *
from PyQt5.QtCore import *
import heapq
import os

def find_nearest_node(graph, point):

```

```

if not graph:
    return None
min_dist = float('inf')
nearest_node = None
for node in graph.keys():
    dist = (node[0] - point[0])**2 + (node[1] - point[1])**2
    if dist < min_dist:
        min_dist = dist
        nearest_node = node
return nearest_node

def dijkstra(graph, segments, start, end, limit, x, y, length_name):
    queue = []
    heapq.heappush(queue, (0, start))
    distances = {start: 0}
    previous_nodes = {start: None}
    visited = set()
    path_weights = {}
    path_lengths = {}

    while queue:
        current_distance, current_node = heapq.heappop(queue)
        if current_node in visited:
            continue
        visited.add(current_node)

        if current_node == end:
            break

        for neighbor, weight in graph.get(current_node, {}).items():
            segment_key = (current_node, neighbor)
            if segment_key not in segments:
                segment_key = (neighbor, current_node)

            if segment_key in segments:
                segment_data = segments[segment_key]
                feature = segment_data['feature']
                length = float(feature[length_name])
            distance = current_distance + x * weight + y * length

            if neighbor not in distances or distance < distances[neighbor]:
                distances[neighbor] = distance
                previous_nodes[neighbor] = current_node
                path_weights[(current_node, neighbor)] = weight
                path_lengths[(current_node, neighbor)] = length
                heapq.heappush(queue, (distance, neighbor))

    path = []
    current = end
    while current is not None:

```

```

path.append(current)
current = previous_nodes.get(current)
path.reverse()

if not path or path[0] != start:
    return []

total_length = 0
for i in range(len(path)-1):
    segment = (path[i], path[i+1])
    reverse_segment = (path[i+1], path[i])

    if segment in path_lengths:
        total_length += path_lengths[segment]
    elif reverse_segment in path_lengths:
        total_length += path_lengths[reverse_segment]

if total_length > limit:
    print("Путь подходящей длины не найден")
    return []

total_weight = 0
for i in range(len(path)-1):
    segment = (path[i], path[i+1])
    reverse_segment = (path[i+1], path[i])

    if segment in path_weights:
        total_weight += path_weights[segment]
    elif reverse_segment in path_weights:
        total_weight += path_weights[reverse_segment]

print(f"Общий вес маршрута: {total_weight:.2f}")
print(f"Общая длина маршрута: {total_length:.2f}")
return path

def get_point_coordinates(file_path):
    layer = QgsVectorLayer(file_path, "points", "ogr")
    if not layer.isValid():
        print(f"Ошибка загрузки слоя {file_path}!")
        return None
    feature = next(layer.getFeatures())
    point = feature.geometry().asPoint()
    return (point.x(), point.y())

def load_graph_with_attributes(file_path, weight_field):
    graph = {}
    segments = {}
    layer = QgsVectorLayer(file_path, "graph", "ogr")

    if not layer.isValid():

```

```

print("Ошибка загрузки графа!")
return None, None, None

fields = layer.fields()

for feature in layer.getFeatures():
    geom = feature.geometry()
    lines = geom.asMultiPolyline() if geom.isMultipart() else [geom.asPolyline()]

    for line in lines:
        if len(line) < 2:
            continue

        try:
            weight = float(feature[weight_field])
        except (KeyError, ValueError):
            continue

        start_point = (line[0].x(), line[0].y())
        end_point = (line[-1].x(), line[-1].y())

        segments[(start_point, end_point)] = {
            'feature': feature,
            'geometry': line
        }

        graph.setDefault(start_point, {})[end_point] = weight
        graph.setDefault(end_point, {})[start_point] = weight

return graph, segments, fields, layer.crs().authid()

def save_path(path_points, segments, fields, crs, method, output_path):
    if method == 'memory':
        # Создание временного слоя
        line_layer = QgsVectorLayer(f"LineString?crs={crs}", "path_line_with_attrs", "memory")
        line_pr = line_layer.dataProvider()
        line_pr.addAttributes(fields)
        line_layer.updateFields()

        for i in range(len(path_points)-1):
            segment_start = path_points[i]
            segment_end = path_points[i+1]

            segment_key = (segment_start, segment_end)
            if segment_key not in segments:
                segment_key = (segment_end, segment_start)

            if segment_key in segments:
                segment_data = segments[segment_key]
                new_feature = QgsFeature(segment_data['feature'])

```

```

new_geom = QgsGeometry.fromPolylineXY([
    QgsPointXY(*segment_start),
    QgsPointXY(*segment_end)
])
new_feature.setGeometry(new_geom)
line_pr.addFeatures([new_feature])

line_layer.updateExtents()
QgsProject.instance().addMapLayer(line_layer)
print("Маршрут сохранен во временный слой 'path_line_with_attrs'")
return True

elif method == 'shapefile':
    # Создание папки (если необходимо)
    os.makedirs(os.path.dirname(output_path), exist_ok=True)
        # Создание шейп-файла
    options = QgsVectorFileWriter.SaveVectorOptions()
    options.driverName = "ESRI Shapefile"
    options.fileEncoding = "UTF-8"

    transform_context = QgsProject.instance().transformContext()
    writer = QgsVectorFileWriter.create(
        output_path,
        fields,
        QgsWkbTypes.LineString,
        QgsCoordinateReferenceSystem(crs),
        transform_context,
        options
    )

if writer.hasError() != QgsVectorFileWriter.NoError:
    print(f"Ошибка создания шейп-файла: {writer.errorMessage()}")
    return False

# Добавление объекта
for i in range(len(path_points)-1):
    segment_start = path_points[i]
    segment_end = path_points[i+1]

    segment_key = (segment_start, segment_end)
    if segment_key not in segments:
        segment_key = (segment_end, segment_start)

    if segment_key in segments:
        segment_data = segments[segment_key]
        feature = QgsFeature(fields)
        feature.setGeometry(QgsGeometry.fromPolylineXY([
            QgsPointXY(*segment_start),
            QgsPointXY(*segment_end)
        ]))

```

```

# Копирование атрибутов
for field in segment_data['feature'].fields():
    feature[field.name()] = segment_data['feature'][field.name()]

writer.addFeature(feature)

del writer # окончание записи
print(f'Маршрут сохранен в файл: {output_path}')

# Добавление слоя в QGIS
layer_name = os.path.splitext(os.path.basename(output_path))[0]
if QgsProject.instance().mapLayersByName(layer_name):

QgsProject.instance().removeMapLayer(QgsProject.instance().mapLayersByName(layer_name)[0])
result_layer = QgsVectorLayer(output_path, layer_name, "ogr")
QgsProject.instance().addMapLayer(result_layer)
return True

else:
    print(f'Неизвестный метод сохранения: {method}')
    return False

def main():
    # Метод сохранения
    save_method = 'shapefile' # Варианты: 'memory' (временный слой) или 'shapefile' (файл)

    x = 1.0 # Коэффициент значения для поля «вес»
    y = 0 # Коэффициент значения для поля «длина»

    # Путь к исходным данным.
    graph_path = "D:/Новая папка/Граф/граф 40-90.shp" #Путь до графа.
    start_path = "D:/Новая папка/Нач/точка старта 2.shp" #Путь до точки старта (В файле
    должна быть всего одна точка).
    end_path = "D:/Новая папка/Кон/точка назначения 2.shp" #Путь до точки окончания
    (В файле должна быть всего одна точка).
    output_path = "D:/Новая папка/Результаты/маршрут.shp" #Путь для сохранения
    результата.

    # Параметры алгоритма
    limit = 5000 #Максимально допустимая длина пути
    weight_field = "вес" #Название атрибутивного поля, содержащего весовые значения
    отрезков.
    length_name = "длина" #Название атрибутивного поля, содержащего значения длины
    отрезков.

    # Загрузка данных
    graph, segments, fields, crs = load_graph_with_attributes(graph_path, weight_field)
    if not graph:
        return

```

```
# Получение точек
start_point = get_point_coordinates(start_path)
end_point = get_point_coordinates(end_path)
if not start_point or not end_point:
    return

# Поиск пути
start_node = find_nearest_node(graph, start_point)
end_node = find_nearest_node(graph, end_point)
if not start_node or not end_node:
    return

path_points = dijkstra(graph, segments, start_node, end_node, limit, x, y, length_name)
if not path_points:
    return

# Сохранение результата
if not save_path(path_points, segments, fields, crs, save_method, output_path):
    print("Ошибка сохранения маршрута!")

main()
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2025684640**

**«Программа для вычисления оптимального маршрута беспилотного воздушного судна в среде геоинформационной системы»**

Правообладатель: **Максимова Софья Евгеньевна (RU)**

Авторы: **Максимова Софья Евгеньевна (RU), Максимов Глеб Евгеньевич (RU)**

Заявка № **2025682791**

Дата поступления **01 августа 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 сентября 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат обладателя № 300E5414201609002026  
Владимир Зубов Юрий Сергеевич  
Действителен с 10.09.2016 по 03.10.2025

**Ю.С. Зубов**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2025685497**

**«Генератор графа пространственных данных для геоинформационного моделирования воздушного пространства для вычисления маршрутов беспилотных воздушных судов»**

Правообладатель: **Максимова Софья Евгеньевна (RU)**

Авторы: **Максимова Софья Евгеньевна (RU), Максимов Глеб Евгеньевич (RU)**

Заявка № **2025684337**

Дата поступления **29 августа 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 сентября 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат Сер2670106300015426167000026  
Владелец Зубов Юрий Сергеевич  
действителен с 10.09.2024 по 03.10.2025

**Ю.С. Зубов**



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акты о внедрении результатов диссертационного исследования



ООО «Небесная механика»  
117485, г. Москва, ул. Профсоюзная,  
дом №84/32, строение 1, этаж 3, помещение 1/3  
ИНН 7723918518  
ОГРН 1147746964144

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «Небесная Механика»



АКТ О ВНЕДРЕНИИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Максимовой Софьи Евгеньевны

на тему: «Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации».

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационного исследования внедрены в работу ООО «Небесная Механика» в деятельности по планированию использования воздушного пространства, оценкой рисков работ с применением беспилотных воздушных судов и построением оптимальных маршрутов их перемещения из точки старта в точку назначения.

Геоинформационная риск-ориентированная модель воздушного пространства в виде взвешенного графа пространственных данных, сохраняющего структуру воздушного пространства, актуальна для применения алгоритмов вычисления оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов.

Реализуемый подход к моделированию учитывает основные принципы деятельности по организации применения беспилотных воздушных судов гражданской авиации. Теоретическая концепция и методы, изложенные в диссертационном исследовании, используются в рамках выполнения работ по разработке модуля планирования маршрутов в программном комплексе управления автономными зарядными станциями с беспилотными воздушными судами.

Руководитель учебного центра, руководитель проекта

С.А. Заверткин



УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
АО «Урало-Сибирская  
геоинформационная компания»



**АКТ О ВНЕДРЕНИИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Максимовой Софии Евгеньевны  
на тему:

«Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации»

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность Акционерного Общества «Урало-Сибирская геоинформационная компания» в части, касающейся аналитической работы по перспективному развитию геоинформационных технологий предприятия. Кроме того, изложенный подход к геоинформационному риск-ориентированному моделированию воздушного пространства, ограничений для полетов и вычислению оптимального маршрута применен для организации авиационных работ в регионах: Республика Башкортостан, Ханты-Мансийский Автономный округ – Югра, Свердловская область.

Онтологический подход для систематизации знаний о воздушном пространстве и производственной деятельности эксплуатанта беспилотных воздушных судов (далее – БВС), применяемый в диссертационном исследовании, способствует расширению возможностей использования существующих геоинформационных систем (далее – ГИС) для проектирования и реализации тематических геоинформационных моделей его сегментов. Разработанный в рамках исследования новый тип геоинформационной модели воздушного пространства в виде риск-ориентированного графа пространственных данных пригоден для применения существующих алгоритмов автоматизированного вычисления оптимальных маршрутов в ГИС-среде.

Руководитель проекта

Е.А. Усольцева



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЗЕМЕЛЬНЫЙ ФОНД»**

Адрес: 644043, Россия, г. Омск, ул. Кемеровская, 10, офис 406. Тел./факс: (3812) 25-80-39, 24-10-04, 24-23-37. E-mail: [info@nzfond.ru](mailto:info@nzfond.ru) Сайт: [www.nzfond.ru](http://www.nzfond.ru)  
 ИНН 5503102449 КПП 550301001 БИК 045209673 к/с 30101810900000000673  
 Р/с № 40702810345000093248 в Омском отделении № 8634 ПАО СБЕРБАНК

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «НЗФ»

В.Н. Ярмошик

2025 г.



**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

**РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Максимовой Софии Евгеньевны

на тему:

«Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов гражданской авиации»

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность ООО «Национальный земельный фонд» в рамках проектной и аналитической деятельности, связанной с планированием использования воздушного пространства, оценкой рисков выполнения работ с применением беспилотных воздушных судов (далее – БВС) и построением оптимальных маршрутов их перемещения из точки старта в точку назначения. Геоинформационный подход к оценке рисков выполнения авиационных работ с применением БВС, изложенный в диссертационном исследовании, соответствует методикам оценки рисков эксплуатанта БВС в производственной деятельности. Методика вычисления оптимального маршрута использована при выполнении работ с применением БВС в Омской, Томской, Курганской, Иркутской областях, Красноярском крае.

Руководитель отдела геодезии

А.Н. Химченко



АО «КБ НАВИС»  
 Санкт-Петербургский филиал  
 194044, г. Санкт-Петербург,  
 ул. Менделеевская, д. 9  
 e-mail: navisspb@navis.ru  
 Тел./факс: +7 (812) 456-08-71  
 ОКПО 44473627, ОГРН 1027700456024  
 ИНН/КПП 7725075060/781303001

«УТВЕРЖДАЮ»  
 директор Санкт-Петербургского  
 филиала АО «КБ НАВИС»  
 К. Т. Н.



АКТ

реализации результатов диссертационного исследования  
 на тему «Разработка методики геоинформационного моделирования воздушного  
 пространства для построения оптимальных маршрутов беспилотных воздушных  
 судов гражданской авиации» Максимовой Софии Евгеньевны

Настоящий акт составлен о том, что предложенный автором результат  
 научных исследований, в части, касающейся вопросов научно-методического  
 обеспечения деятельности авиационно-транспортной системы беспилотных  
 воздушных судов (БВС) гражданской авиации, а именно:

- геоинформационная модель операционного и функционального  
 пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного  
 пространства,

были использованы при подготовке материалов пятого этапа НИР «Пунктир»  
 в предложениях по разработке проектов концепции и программы развития  
 навигационных средств до 2035 года.

Внедрение указанного результата нацелено на дальнейшее  
 совершенствование средств геоинформационного обеспечения авиационно-  
 транспортной системы эксплуатанта БВС на основе процедур  
 автоматизированной оценки пространственной обстановки путем получения  
 количественного значения оценки рисков в сегменте воздушного  
 пространства при решении задачи вычисления оптимального маршрута БВС.  
 Значение показателя своевременности вычисления оптимального маршрута  
 беспилотного воздушного судна повысилось на 10% по сравнению с  
 существующими показателями.

Руководитель группы математического обеспечения  
 Санкт-Петербургского филиала АО «КБ НАВИС»  
 К.Т.Н.

*Пучков*

В.Ю.Пучков