

На правах рукописи

Максимова Софья Евгеньевна

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

Специальность 1.6.20. – Геоинформатика, картография

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель:

Духин Степан Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»

Официальные оппоненты:

Алтынцев Максим Александрович,
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

Конкин Алексей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Геодезия и геоинформатика» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится 8 апреля 2026 г., в 15.00 на заседании диссертационного совета ДС 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета:
<https://www.rshu.ru/university/dissertations>.

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Я.А. Петров

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время идет бурный рост направлений использования беспилотных авиационных систем (далее – БАС) в различных сферах деятельности социума. Развитие транспортных беспилотных технологий для различных сфер применения включено в перечень важнейших научноемких 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».

Использование беспилотных воздушных судов (далее – БВС) в практических целях связано с большим числом природных, техногенных и социальных опасностей и угроз в окружающей геосреде. По сути, геопространственная БВС-деятельность является высокорисковой. На сегодняшний день не решена актуальная задача разработки аппарата геоинформационной поддержки регулирования (геоконтроллинга) рисковой геопространственной БВС-активности, особенно применительно к организации их маршрутной логистики.

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 рискового 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 БВС-активности.

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

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

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ предметной области рисковой БВС-активности.
2. Разработка геоинформационной модели операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в регионе.
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 выработка пространственно-содержательных рекомендаций.

Новизна научных результатов:

1. Геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации отличается:

- раздельным представлением квазистационарной 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 выработка 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 научно-исследовательские работы, 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. Внедрение геоинформационной модели операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства в пятый этап НИР «Пунктир» позволило повысить показатель своевременности вычисления оптимального маршрута БВС на 10% по сравнению с существующими показателями. Внедрение методики оценки пространственной обстановки и выработки пространственно-

содержательных рекомендаций в интересах регулирования специальной БВС-активности во второй этап НИР «Исследования и анализ современного состояния отечественных и зарубежных технических средств гидрометеорологии и океанологии, применяемых в интересах ВМФ, определение путей их развития» позволило увеличить показатель полноты оперативного представления и анализа ситуации в воздушном пространстве на 14% для функционального пространства БВС-активности и на 19% для операционного пространства БВС-активности.

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 АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-

гидрографический институт» во второй этап НИР «Исследования и анализ современного состояния отечественных и зарубежных технических средств гидрометеорологии и океанологии, применяемых в интересах ВМФ, определение путей их развития», АО «КБ НАВИС» в пятый этап НИР «Пунктир», в деятельность двух эксплуатантов БВС гражданской авиации и одного производителя программного обеспечения для автономных дронопортов, в учебный процесс ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 13 работ, из них: 5 – 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 разделов, заключения, списка литературы, четырех приложений. В работе содержится 7 таблиц, 40 рисунков, 39 формул. Список литературы включает 143 наименования, в том числе ресурсы в сети Интернет. Общий объем диссертации – 158 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы, предмет, объект, цели и задачи исследования, приведена информация по апробации исследования.

На основании анализа проблемных вопросов предметной области территориальной рисковой БВС-активности сформулирована следующая формальная постановка задач исследований (Рисунок 1):

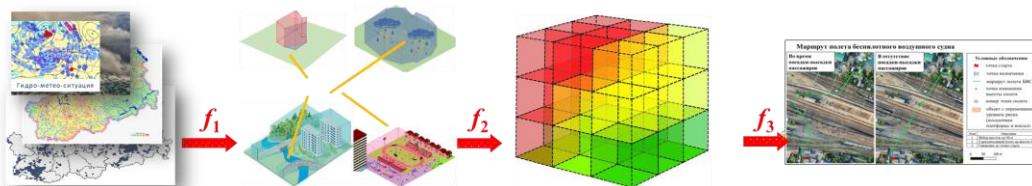


Рисунок 1 – Формальная постановка задачи исследования.

- 1) f_1 – построить отображение предметной области в геоинформационную модель воздушного пространства,
- 2) f_2 – 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.

В главе 1 выполнен анализ предметной области рисковой БВС-активности и постановка задачи исследования.

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 эксплуатация БВС связаны 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 беспилотнойaviацией, 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 отсутствием 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 воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации.

2) Разработать методику оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработки 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 2.

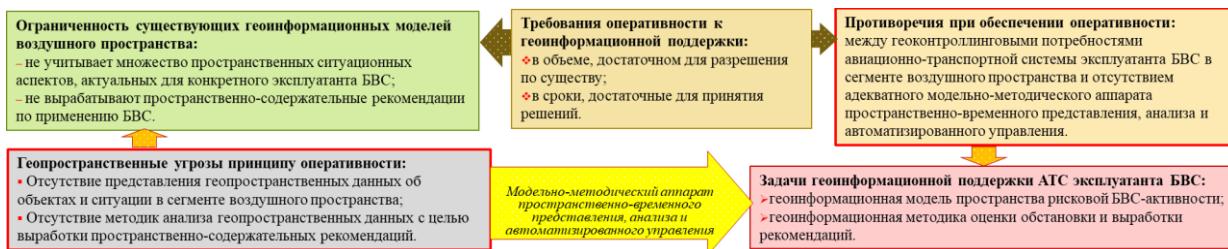


Рисунок 2 – Логика постановки цели и задач исследований.

В главе 2 разрабатывается геоинформационная модель воздушного пространства БВС-активности эксплуатанта гражданской авиации. Модель включает в себя формализмы, описывающие 2 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).

В составе функциональной геоинформационной модели пространства БВС-активности находятся директивно-контроллинговая и киберфизическая геоинформационные подмодели.

Киберфизическая подмодель функционального пространства БВС-активности авиационно-транспортной системы эксплуатанта представлена на Рисунке 3. Данное пространство киберспособно, когда оно наблюдаемо ($CSp \neq \emptyset$), контролируемо ($NSp \neq \emptyset$), управляемо ($MSp \neq \emptyset$).

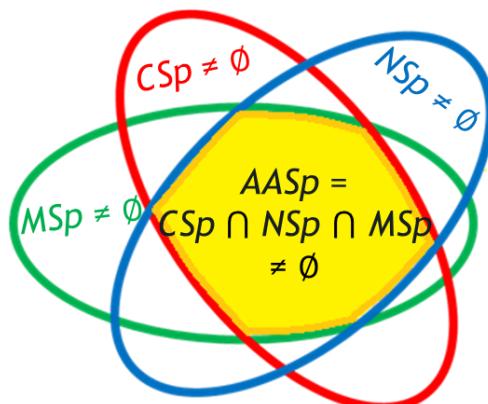


Рисунок 3 – Киберфизическая подмодель функционального пространства БВС-активности.

Директивно-контроллинговая подмодель представляет собой доступное пространство для полетов БВС. В целях определения допустимой зоны перемещения БВС обосновано понятие «ограничение в воздушном пространстве или его сегменте» (далее – «ограничение»), разработана и обоснована их концептуальная модель, а также классификация. Геоинформационные модели ограничений описаны как составные геоинформационные единицы с применением географических образов и формул. Для формализованного описания данных моделей разработана система параметров.

В работе выполнен анализ нормативно-правовых актов РФ. Для описания геоинформационных моделей ограничений, связанных со структурой воздушного пространства, следует использовать такие графические элементы, как прямоугольная призма, цилиндр, эллиптический цилиндр, а также прямая многоугольная призма, образованная по контуру буферной зоны. Лицо, подготавливающее документы для подачи в органы Единой Системы Организации Воздушного Движения (далее – ЕС ОрВД), может получить разрешение на полет БВС внутри ограничивающего элемента данной категории. Таким образом формируются исключения из ограничений. На Рисунке 4 изображен географический образ i-го ограничения в виде прямоугольной призмы с исключением для j-го БВС. Для описания геоинформационной модели данного ограничения предлагается формула (1):

$$Z_i = \Phi \{ [P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n), (H_B - H_H)], [D_i, P_{t_i}^{нач}, P_{t_i}^{прод}], [A_i^{назв}, A_j^{искл}] \} \quad (1)$$

где Z_i – i-е ограничение в воздушном пространстве,

Φ – функция геоинформационного моделирования,

P_n – n-я точка прямоугольной призмы,

X_n – абсолютная широта точки,

Y_n – абсолютная долгота точки,
 H_b – ограничение высоты элемента воздушного пространства сверху,
 H_n – ограничение высоты элемента воздушного пространства снизу,
 D_i – дата действия ограничения,
 $Pt_i^{нач}$ – время начала действия ограничения,
 $Pt_i^{прод}$ – продолжительность действия ограничения,
 $A_i^{назв}$ – уникальное название ограничения,
 $A_j^{искл}$ – исключение из ограничения для j -го БВС.

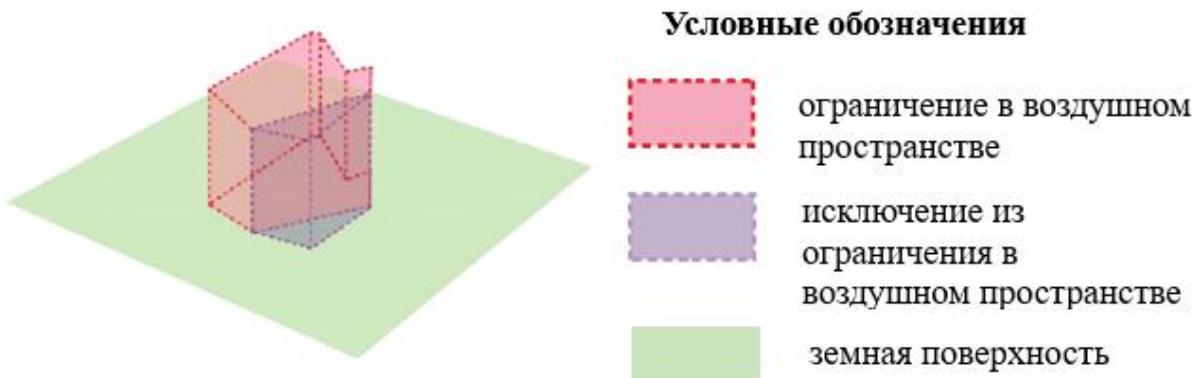


Рисунок 4 – Пример географического образа i -го ограничения в воздушном пространстве с исключением для j -го БВС.

Необходимым компонентом геоинформационной модели воздушного пространства являются ограничения, обусловленные его классификацией. Соблюдение интервалов эшелонирования обязательно для всех воздушных судов в воздушном пространстве классов А и С. В геоинформационном моделировании совокупность интервалов эшелонирования относительно точки пространственного положения j -го БВС в момент времени t графически изображается в форме цилиндра, высота и радиус которого соответствуют величине интервалов вертикального и горизонтального эшелонирования. Моделирование данных ограничений выполняется в отношении запланированных полетов воздушных судов. Пилотирование по маршрутам полетов беспилотных воздушных судов в классе воздушного

пространства Н доступно только БВС, оснащенным оборудованием, требования к которому установлены нормативно-правовыми актами.

При планировании полета БВС необходимо учесть ограничения по метеорологическим условиям. С этой целью следует принимать во внимание информацию об эксплуатационных ограничениях БВС, таких, как максимально допустимая скорость ветра, температурный диапазон рабочей среды, наличие запрета на полет в условиях дождя, тумана, града, грозы, степень защиты оболочки БВС. В целях геоинформационного моделирования участков, в границах которых полет небезопасен по причине несоответствия метеорологических условий эксплуатационным ограничениям типа или единичного экземпляра БВС, следует анализировать поля пространственно-временного распределения метеоэлементов.

В модели воздушного пространства должны быть учтены ограничения, связанные с наличием материальных объектов, препятствующих полету БВС. Сочетание цифровой модели рельефа и геоинформационных моделей наземных ограничений позволяет образовать модель поверхности, ограничивающую минимальную высоту полета, как показано на Рисунке 5.



Рисунок 5 – Пример модели поверхности, ограничивающей минимальную высоту полета БВС.

Таким образом, модель пространства, доступного для полета БВС, следует описать формулой (2):

$$B\Pi_j = B\Pi - (Z - Z_{искл}) - Z_m - Z_n \quad (2)$$

где $B\Pi_j$ – воздушное пространство, доступное для полета j -го БВС,
 $B\Pi$ – воздушное пространство или его сегмент,
 Z – совокупность ограничений в воздушном пространстве,
 $Z_{искл}$ – совокупность исключений из ограничений в воздушном пространстве,
 Z_m – совокупность ограничений по метеорологическим условиям,
 Z_n – совокупность наземных материальных объектов, ограничивающих перемещение БВС.

В главе 3 исследована геоинформационная модель операционного пространства БВС-активности, в котором решаются поставленные задачи. Геоинформационная модель операционного пространства детерминируется окружающей геосредой, которой присущи риски. Таким образом, операционное пространство БВС-деятельности оценивается на основе риск-ориентированного подхода. В авиационной отрасли не сформирован универсальный подход к управлению рисками. Для исследования методик и процессов оценки рисков в гражданской авиации использована научная литература и профессиональный опыт автора в сфере применения и эксплуатации БВС. Методы оценки рисков для пилотируемой авиации затруднительны к использованию эксплуатантами БВС ввиду их эксплуатационных особенностей. Оценка рисков применения БАС пользователями имеет индивидуальный характер в силу различий в методиках, в используемой технике, особенностей выполнения полетных заданий и других факторов.

Операционная геоинформационная модель пространства БВС-активности содержит в себе модель геосреды и модель состояния авиационно-транспортной системы эксплуатанта. В составе модели геосреды содержится совокупность моделей геопространственных мероприятий. В модели авиационно-транспортной системы эксплуатанта

БВС присутствуют пространственно-содержательная модель специального геообъекта БВС и модель соответствующего экипажа. На основе данного описания геоинформационной модели операционного пространства БВС в работе предложена классификация факторов риска применения БВС, соответствующая категориям «Человек», «Машина» и «Среда», традиционно применяемые в гражданской авиации. Рисунок 6 иллюстрирует их влияние друг на друга при оценке риска полетного задания.

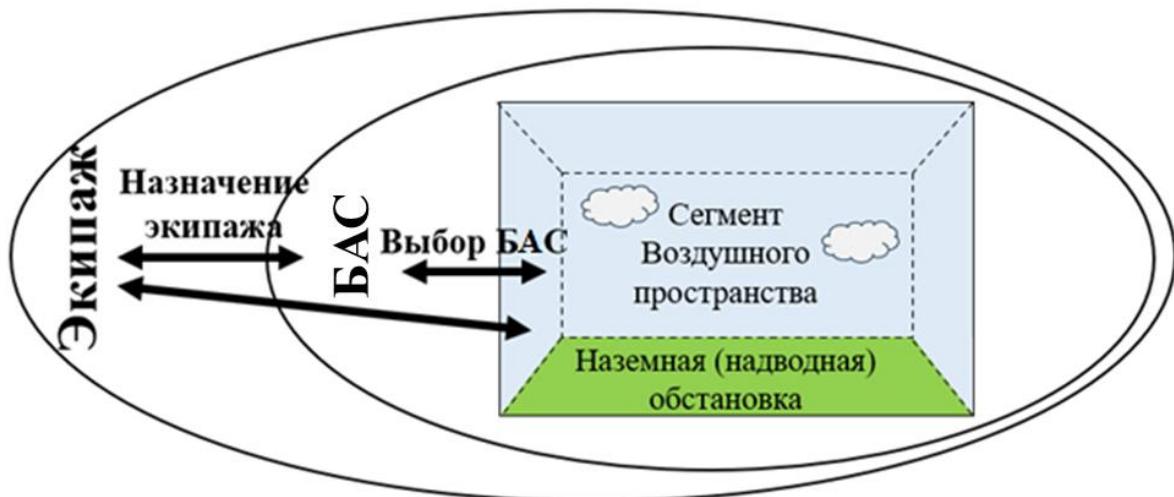


Рисунок 6 – Схема влияния основных аспектов оценки рисков выполнения полетного задания

В целях моделирования необходимо дискретизировать воздушное пространство на ячейки, а ось времени – на равные интервалы. Значение риска в дискретной единице анализа вычисляется по формуле (3):

$$I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{\Theta K}[\Phi_{BVC}(R_{vp} \& R_{ta})] \quad (3)$$

где $I_{(x,y,z,t)}$ — ячейка пространства по координатам x , y , z в момент времени t ,

R_{vp} — переменная для обозначения совокупности рисков в анализируемом воздушном пространстве или его сегменте,

R_{ta} — переменная для обозначения совокупности рисков на территории или акватории,

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

$\Phi_{эк}$ — функция для учета оценки способности экипажа БАС к выполнению целесообразных действий в условиях возможных рисков.

В таком случае оценка рисков конкретного полетного задания в ГИС-среде выполняется согласно формуле (4):

$$R_j = \sum_{i=1}^n I_{(x,y,z,t)} \quad (4)$$

где R_j — оценка рисков j -го полетного задания.

Предложенный подход к оценке пространственно-временного распределения рисков полета БВС на основе использования ГИС 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. Разработанный подход лежит в основе методики оценки обстановки в пространственной системе рисковой БВС-активности, которая, в свою очередь, используется для выработки пространственно-содержательных рекомендаций в части, касающейся БВС-деятельности.

В главе 4 разработана методика выработки пространственно-содержательных рекомендаций по регулированию рисковой пространственной БВС-деятельности.

Критерии оптимальности маршрута БВС у пользователей могут различаться. На Рисунке 7 изображена семантическая сеть формирования понятия «Оптимальность маршрута полета БВС». Сумма весовых значений отрезков маршрута, соединяющего точку старта с точкой назначения, является целевой функцией, стремящейся к минимуму. В свою очередь, требования к отсутствию превышения общей протяженности маршрута над технической дальностью и продолжительностью полета БВС, а также

построению его в доступном воздушном пространстве – ограничениями. Следует предложить формулу оптимизации (5):

$$\begin{aligned} F_{\text{опт}}(R_i) &\rightarrow \min, \\ S &\leq TД(j), \\ S &\in ВП_j \end{aligned} \quad (5)$$

где $F_{\text{опт}}$ – функция оптимизации,
 R_j – оценка рисков полетного задания j -го БВС,
 S – маршрут перемещения,
 $TД(j)$ – техническая дальность и продолжительность полета j -го БВС,
 $ВП_j$ – воздушное пространство, доступное для полета j -го БВС,

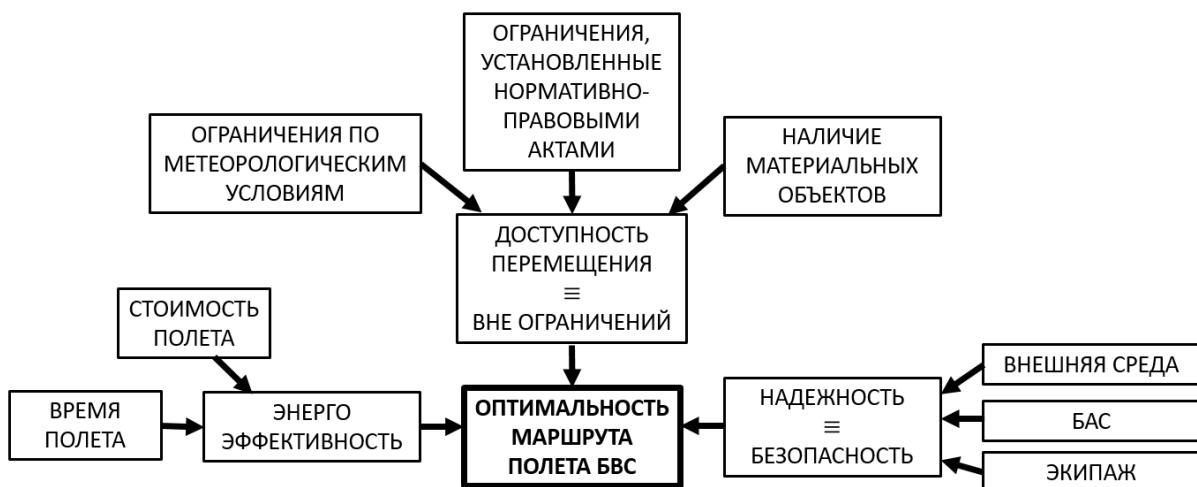


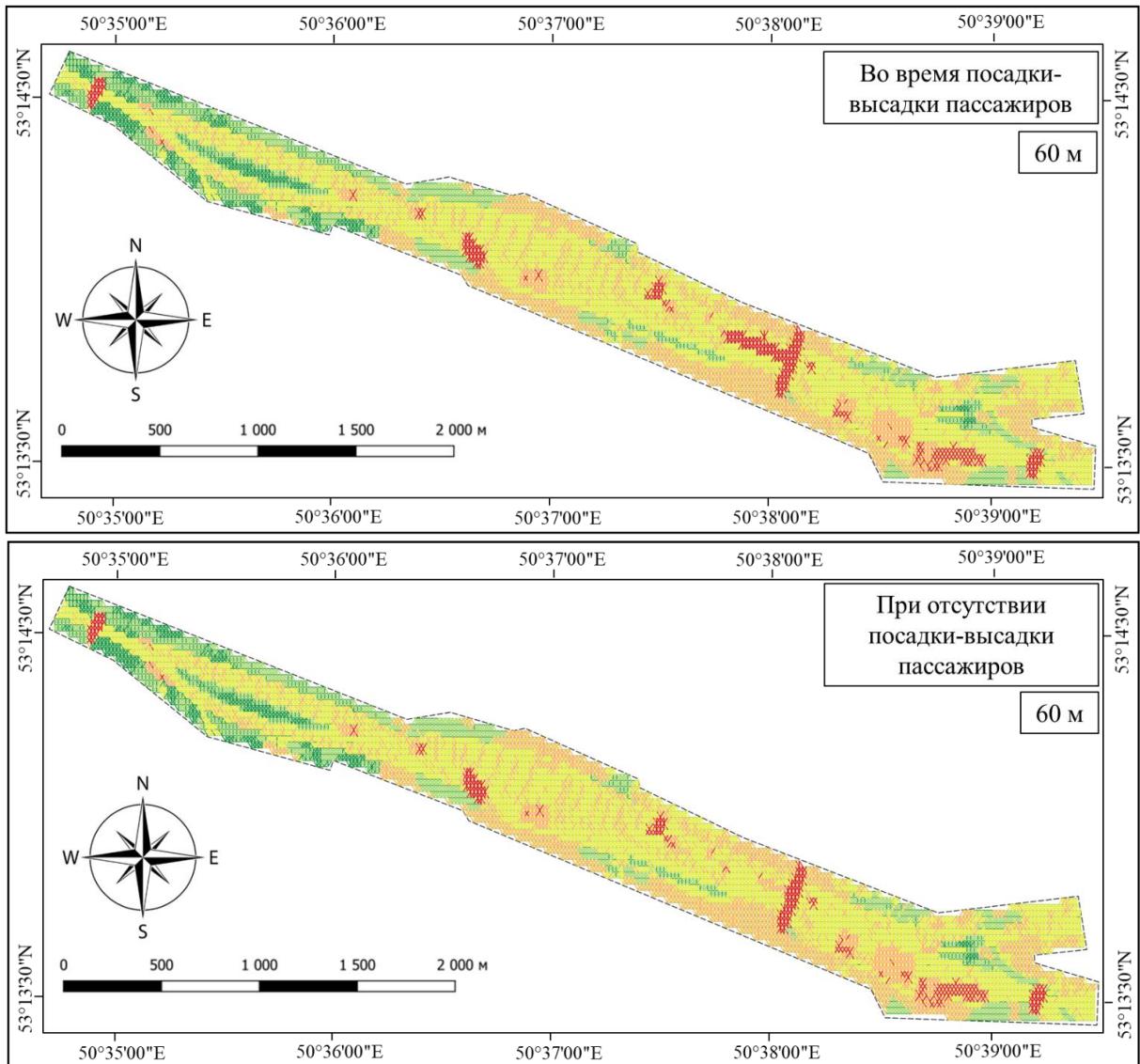
Рисунок 7 – Семантическая сеть формирования понятия
«Оптимальность маршрута полета БВС»

Множество алгоритмов используют для вычисления оптимального маршрута граф пространственных данных. Учитывая требования нормативно-правовых актов к планам полетов и к представлениям на установление местного или временного режима, модель воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов БВС возможно реализовать в виде графа с вершинами, расположенными с интервалом 1" в плоскости и 10 м по высоте. Вершины следует соединить горизонтальными

и вертикальными отрезками, возможно опционально добавить наклонные отрезки. Вес отрезков сформирован на основе оценки рисков полета БВС в информационной единице модели воздушного пространства, а также протяженности отрезков. При построении графа необходимо учитывать время, что позволяет моделировать доступность воздушного пространства в заданные интервалы и изменчивость весовых значений отрезков.

В рамках исследования выполнено построение пространственно-временной модели сегмента воздушного пространства в виде графа пространственных данных в среде QGIS (версия 3.34.1 на компьютере HP ProDesk 600 G3 (1ND84EA)). Объект моделирования расположен над железнодорожной станцией Кинель (Самарская область) и прилегающей местностью. В качестве стартово-посадочных площадок выбраны точки на горизонтальных поверхностях на расстоянии от производственных зданий, значимых для функционирования железнодорожного транспорта. В моделируемой ситуации актуально применение БВС мультироторного типа для передачи небольших грузов, что позволит уменьшить количество перемещений персонала.

С учетом рельефа, высоты зданий, сооружений, растительности и других объектов, а также необходимости уменьшить рабочую область анализа, высота сегмента воздушного пространства ограничена 90 м абсолютной высоты. Весовые значения отрезков присвоены с учетом гипотетической оценки рисков пилотирования БВС. На Рисунке 8 изображен фрагмент риск-ориентированной модели сегмента воздушного пространства.



Условные обозначения

Вес отрезков, балл

- 1,00 – 3,50
- 3,51 – 5,50
- 5,51 – 8,50
- 8,51 – 12,00
- 12,01 – 22,70

60 м

высота отрезков графа (абс.)

— — — граница модели сегмента воздушного пространства

Рисунок 8 – Горизонтальные отрезки взвешенного графа

пространственных данных.

При построении графа учтены ограничения для полетов БВС. На Рисунке 9 изображены фрагменты модели сегмента воздушного пространства: слева изображен фрагмент взвешенного графа пространственных данных, в котором отсутствуют отрезки на высоте 50 м абсолютной высоты по причине наличия автомобильного моста,

во фрагменте справа присутствуют отрезки с недопустимым уровнем риска над автомобильным мостом на высоте 60 м абсолютной высоты.

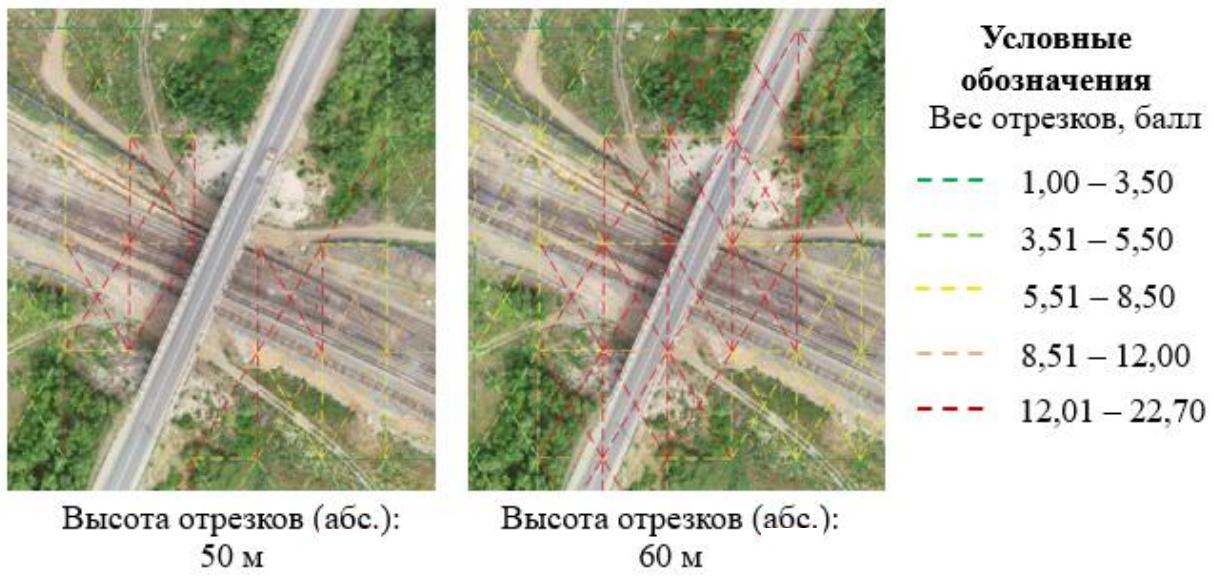


Рисунок 9 – Фрагменты модели сегмента воздушного пространства в виде взвешенного графа

Реализована программа для выработки пространственно-содержательных рекомендаций по перемещению БВС из точки старта в точку назначения с наименьшим суммарным весом с учетом скорости. На Рисунке 10 изображен оптимальный маршрут полета, который проходит по участкам с наименьшим уровнем риска, огибая препятствия, избегая отрезков с недопустимым уровнем риска. На основе данных рекомендаций возможно описать маршрут для оформления представления на установление местного режима. При этом целесообразно выполнить «спрямление» маршрута (без увеличения уровня риска) для упрощения подготовки и подачи документов в органы ЕС ОрВД.

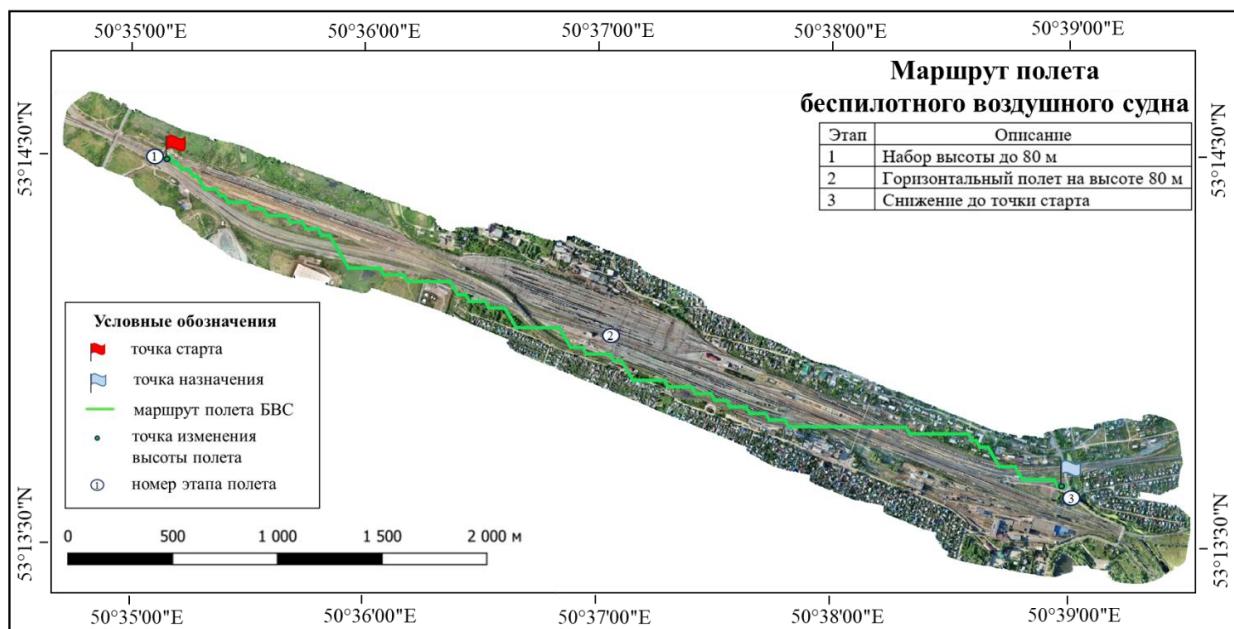


Рисунок 10 – Оптимальный маршрут БВС между стартово-посадочными площадками

Методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработка пространственно-содержательных рекомендаций структурирована в соответствии с этапами выполнения действий (Таблица 1).

Таблица 1 – 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 приемлемости воздушного пространства для полета 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

В работе сформированы и приведены практические рекомендации применения методики.

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, что позволяет обеспечить геоконтроллинговую поддержку в сегменте воздушного пространства на единой геопространственной основе, в отличие от существующих методик управления деятельностью эксплуатанта БВС.
2. Разработана геоинформационная модель операционного и функционального пространства рисковой БВС-активности в сегменте воздушного пространства отличается комплексным учетом тематической разнородной геопространственной информации о сегменте воздушного пространства на единой геопространственной основе, что позволяет обеспечить геоконтроллинговую поддержку деятельности по эксплуатации авиационно-транспортной системы эксплуатанта БВС.
3. Разработана методика оценки пространственной обстановки в интересах регулирования специальной БВС-активности и выработка пространственно-содержательных рекомендаций, которая отличается возможностью оперативного наполнения, анализа, обобщения геопространственной информации о пространстве БВС-активности и адаптацией алгоритмов вычисления оптимальных маршрутов

перемещения в трехмерном пространстве к существующим геопространственным объектам и ситуациям, что позволяет обеспечить оперативную выработку пространственно-содержательных рекомендаций по оптимизации БВС-деятельности и поддержку планирования полетов в географически конкретной обстановке.

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. Его внедрение обеспечивает повышение своевременности вычисления оптимальности маршрута БВС на 10% и увеличение эффективности в части, касающейся полноты оперативного представления и анализа ситуации в сегменте воздушного пространства, для функционального пространства БВС активности – на 14%, для операционного – на 19%.

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.

Работы, опубликованные по теме диссертации

В высокорейтинговых журналах, включенных в список ВАК:

1) 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.

2) Максимова, С.Е. Моделирование ограничений в воздушном пространстве Российской Федерации для вычисления оптимальных

маршрутов полетов беспилотных воздушных судов / С.Е. Максимова // Мир транспорта. – 2024. – №6. – С. 84-91.

3) Максимова, С.Е. Рискоориентированное 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. – №28(1). – С. 39-52.

4) Щербаков, В.В. Геоинформационное моделирование эшелонирования в воздушном пространстве Российской Федерации для вычисления маршрутов перемещения гражданских беспилотных воздушных судов / В.В. Щербаков, С.Е. Максимова // Вестник СГУГИТ. – 2025. – Т. 30, №6. – С.120-127.

5) Максимова, С.Е. Геоконтроллинг региональной БВС-активности: задача оперативного регулирования геопространственной логистики беспилотного воздушного судна / С.Е. Максимова, Е.Л. Бородин, Г.Е. Максимов, С.И. Биденко // Эксплуатация морского транспорта. – 2026. – №1. – С. 15-27.

Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6) Максимова, С.Е. Программа для вычисления оптимального маршрута беспилотного воздушного судна в среде геоинформационной системы: Свидетельство от 16.09.2025 №2025684640 / С.Е. Максимова, Г.Е. Максимов. – М.: ФСИС РФ, 2025.

7) Максимова, С.Е. Генератор графа пространственных данных для геоинформационного моделирования воздушного пространства для вычисления оптимальных маршрутов беспилотных воздушных судов: Свидетельство от 23.09.2025 №2025685497 / С.Е. Максимова, Г.Е. Максимов. – М.: ФСИС РФ, 2025.

В других научных изданиях:

8) Максимова, С.Е. Геоинформационный подход к моделированию воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов гражданской авиации // Сборник материалов V Всероссийской Научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры». – СПб, 2024. – С.161-171.

9) Максимова, С.Е. К вопросу о геоинформационном моделировании воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Образцовый маршрут». – М., 2024. – С.184-187.

10) Максимова, С.Е. Об актуальности применения геоинформационных технологий для построения оптимальных маршрутов полетов беспилотных воздушных судов // Материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа». – М., 2024. – С.357-359.

11) Максимова, С.Е. Геоинформационное моделирование ограничений в воздушном пространстве Российской Федерации для полетов беспилотных воздушных судов / С.Е. Максимова, С.В. Духин // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ГЕОФОРУМ. НИЖНИЙ НОВГОРОД». Материалы конференции. – 2024. – С. 61-64.

12) Максимова, С.Е. Геопорталы для работы с информацией о структуре воздушного пространства / С.Е. Максимова, С.В. Духин // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России». – Воронеж, 2024. – С.137-139.

13) Максимова, С.Е. Использование геоинформационных систем для оценки рисков применения беспилотных воздушных судов гражданской авиации // Материалы Всероссийской научно-практической конференции

«Перспективы развития информационных систем и технологий в современном обществе». – Орел, 2024. – С.257-261.

14) Максимова, С.Е. Геопорталы для работы с информацией о структуре воздушного пространства РФ // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития информационных систем и технологий в современном обществе». – М., 2024. – С.257-261.

15) Максимова, С.Е. Геопорталы для планирования полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве Российской Федерации» // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – №26. – С. 47-52.