

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

На правах рукописи

НГУЕН НГОК ХОАНГ КУАН

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ МАРШРУТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА С
ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПОЛЁТОВ

Специальность 2.9.6 – «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.и.н., доцент
Нечаев Владимир Николаевич

Москва 2026

Содержание

Введение	5
Глава 1. Теоретические основы проектирования организации воздушного пространства	15
1.1. Основные концепции организации воздушного пространства	15
1.2. Общий процесс проектирования организации воздушного пространства и маршрутов обслуживания воздушного движения	17
1.3. Некоторые проекты, связанные с оптимизацией сети маршрутов обслуживания воздушного движения, осуществляемые на различных континентах мира	21
1.4. Структура воздушного пространства района полётной информации Хошимина (Вьетнам)	24
1.5. Предлагаемые меры по увеличению пропускной способности воздушного пространства районного диспетчерского центра Хошимина	42
Выводы по главе 1	56
Глава 2. Разработка модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения для воздушного пространства с высокой интенсивностью полётов и планирование их использования	57
2.1. Математическая модель задачи оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения с заданными ограничениями	57
2.2. Обработка входных данных	64
2.3. Алгоритм оптимизации	68
2.4. Результаты модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения	76
2.5. Анализ результатов оптимальных сценариев сети маршрутов обслуживания воздушного движения.....	85

2.6. Планирование использования сети маршрутов обслуживания воздушного движения	89
Выводы по главе 2	99
Глава 3. Разработка оптимизационной модели для динамической ремаршрутизации в условиях недоступности основных маршрутов ОВД	101
3.1. Состояние исследований динамических моделей маршрутизации маршрутов ОВД в мире	101
3.2. Модель динамической маршрутизации маршрутов ОВД	103
3.3. Блок-схема алгоритма с применением алгоритма A-star для ремаршрутизации маршрутов ОВД в трёх сценариях	109
3.4. Результаты модели маршрутизации ОВД и анализ результатов.	115
Выводы по главе 3	136
Глава 4. Оценка результатов исследования и возможностей практического применения разработанных моделей в организации воздушного движения	137
4.1. Сравнительный анализ результатов исследования оптимизированной и существующей сети маршрутов обслуживания воздушного движения	137
4.2. Применение модели динамической маршрутизации для разработки «playbook routes»	141
4.3. Применение моделей оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения и динамической маршрутизации в проектировании воздушного пространства и использования воздушного пространства	147
4.4. Интеграция модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения и модели динамической маршрутизации в автоматизированные системы организации воздушного движения	149
4.5. Модели оптимизации и маршрутизации во взаимодействии с системами организации потоков воздушного движения	152

Выводы по главе 4.....	154
Заключение.....	155
Список сокращений.....	157
Список литературы.....	159
Приложение А: Информация о расположении и типах зон ППМ, используемых для задачи оптимизации сети маршрутов ОВД.....	172
Приложение Б: Информация о бесполётных зонах, используемых в сценарии 2 при развитии модели оптимизации сети маршрутоа ОВД.....	175

Введение

Актуальность темы диссертационного исследования

Гражданская авиация (ГА) зародилась в первые годы двадцатого века, ознаменовав совершенно новый шаг вперед в сфере транспорта. ГА играет важную роль в экономическом, культурном и туристическом развитии страны. Для деятельности ГА главными приоритетами являются увеличение пропускной способности (ПС) воздушного пространства (ВП), оптимизация взлётно-посадочных операций, а также формирование условий для безопасного, экономически целесообразного и стабильного функционирования воздушного движения (ВД) при одновременном соблюдении требований по охране окружающей среды. За последние десятилетия в результате систематического развития и технической модернизации отрасли ГА продемонстрировала стремительный рост, заняв лидирующие позиции среди наиболее устойчивых и технологически совершенных видов транспорта современного мира.

После пандемии COVID-19 ГА не только восстановила утраченные объёмы перевозок, но и продемонстрировала ускоренное развитие [1, 2], что вновь подтвердило её ключевую роль в глобальной экономике. Быстрое наращивание ВД стало мощным стимулом для экономического роста, расширения туристических потоков и углубления международной интеграции. Одновременно с этим столь стремительное восстановление сопровождалось возникновением новых проблем. В ряде секторов ВП, а также на отдельных маршрутах обслуживания воздушного движения (ОВД), фиксируется существенное увеличение интенсивности ВД. В отдельных ситуациях это приводит к перегрузке соответствующих маршрутов, что, в свою очередь, приводит к снижению операционной эффективности, уровня безопасности полётов (БП), отказоустойчивости и стабильности функционирования системы организации воздушного движения (ОрВД) в целом. Это, в свою очередь, актуализирует необходимость разработки дополнительных методов и инструментов, направленных на повышение ПС ВП, оптимизацию

использования ВП (ИВП) и маршрутов ОВД и обеспечение высокого уровня БП. Одним из эффективных подходов для решения этих задач является применение современных методов и инструментов автоматизации и оптимизации.

За последние двадцать лет развитие процессов и систем автоматизации и оптимизации в ОрВД приобрело исключительно важное значение для повышения ПС ВП, обеспечения БП, снижения нагрузки на авиадиспетчеров и оптимизации эксплуатационных затрат [3]. Автоматизация и оптимизация ОрВД способствует не только улучшению качества принятия решений в реальном времени, но и формированию более устойчивой и адаптивной системы ОрВД, способной реагировать на непредвиденные обстоятельства и изменяющиеся условия полётов. В настоящее время все регионы мира придают этому процессу первостепенное значение, что отражается в международных стратегических инициативах и национальных планах развития авиационной инфраструктуры. Так, в Европе стратегические документы Европейского Союза [4], системы ОрВД становятся всё более интегрированными, автоматизированными и ориентированными на применение технологий оптимизации как в ВП, так и на земле. Такой подход обеспечивает надёжную поддержку принятия комплексных управленческих решений в условиях интенсивной нагрузки, способствуя росту показателей ПС ВП, заметному повышению эффективности маршрутного планирования и снижению негативного воздействия авиационной деятельности на окружающую среду. В Азиатско-Тихоокеанском регионе Международная организация гражданской авиации (ИКАО), Азиатско-Тихоокеанское бюро опубликовало официальные руководящие материалы по внедрению автоматизированных и оптимизированных систем ОрВД [5], где подробно изложены стратегические цели в области БП, эффективности и динамического УВД. Особое внимание уделяется оптимизации процедур маршрутизации, минимизации задержек, улучшению координации между наземными и воздушными службами, а также внедрению технологий прогнозирования нагрузки на ВП.

Несмотря на то, что автоматизация и оптимизация рассматриваются как основополагающее направление развития и ключевые стратегии повышения

эффективности ОрВД, существующие системы автоматизации и оптимизации в основном ориентированы на обеспечение связи, навигации и наблюдения (CNS), таких как Многопозиционная система наблюдения (MLAT), Автоматическое зависимое наблюдение – вещательное (ADS-B), связь «диспетчер пилот» по линии передачи данных (CPDLC) и др., а также на инструментах поддержки принятия решений и разрешения конфликтов, например SCTA (Предупреждение о краткосрочном конфликте по радиолокационным данным), AMAN/DMAN (Менеджер прибытия/отправления), TCAS (Система предупреждения столкновения самолётов в воздухе) и др. Тем не менее, инструменты, направленные на оптимизацию ВП и сети маршрутов ОВД, пока не претерпели значительных прорывов. Уже в [4] отмечается, что в будущем необходимо создавать модели и системы на основе мощной платформы данных и экосистемы с большим объёмом информации, интегрирующей методы искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа больших данных. Это открывает возможности для автоматизированной оптимизации сети маршрутов, динамической ремаршрутизации, прогнозирования перегрузок и оперативного реагирования на разнообразные изменения в ВП, включая погодные условия, беспилотные летательные аппараты и новые типы воздушных судов (ВС).

В этом контексте проведение исследований, направленных на разработку методов повышения ПС ВП и создание моделей сети маршрутов ОВД в зонах с высокой интенсивностью полётов, представляется особенно актуальным для развития систем ОрВД. Для оценки эффективности предложенных методологических подходов и моделей оптимизации необходимо выбрать конкретный кейс для проведения моделирования и анализа работы разработанной модели. Выбор ВП Хошима (одного из двух ключевых ВП Вьетнама) обусловлен его стратегически важным положением и высокой интенсивностью ВД: оно выполняет функцию значимого авиационного узла, обеспечивая связь стран Северного полушария - в частности России и Китая - со странами Южного полушария, включая государства Океании, а также граничит с обширным Южно-Китайским морем, являющимся зоной прохождения множества международных

маршрутов ОВД. Такой кейс позволяет проверить работу разработанной модели в условиях реальной перегруженности ВП и иллюстрирует актуальность данной проблематики, что подтверждается многочисленными исследованиями, проведёнными в других странах [6–10].

В свете вышеизложенного становится очевидной необходимость разработки эффективных методов оптимизации сети маршрутов ОВД для ВП Хошимина. При этом во Вьетнаме в целом исследования по оптимизации сети маршрутов ОВД остаются крайне ограниченными, несмотря на растущую потребность в модернизации авиационной инфраструктуры. Существующие работы автора и его коллег заложили основу для дальнейших разработок [11–14], однако они охватывают лишь ограниченный круг вопросов. В частности, остаются нерешёнными ключевые задачи, такие как оптимизация структуры маршрутов ОВД и снижение перегруженности ВП. Таким образом, для повышения эффективности ОрВП и оптимизации сети маршрутов ОВД Вьетнама критически важно разработать и внедрить модель оптимизации сети маршрутов, отвечающую потребностям пользователей.

Степень разработанности темы исследования

Оптимизация сети маршрутов ОВД и ремаршрутизация представляют актуальные задачи современной авиационной отрасли, особенно в условиях высокой плотности полётов, ограниченных воздушных коридоров и усложнённых требований по БП. В течение последних десяти лет эти вопросы привлекают особое внимание исследователей и практиков, поскольку рост интенсивности полётов и усложнение ВД требуют разработки новых методов планирования маршрутов, минимизации задержек и предотвращения конфликтов между рейсами. Значительные исследования по данной проблеме были проведены такими авторами, как Бызов И.Л. [6], Hirabayashi H. и др. [7], Liang H. и др. [8], Zhu D. и др. [9], Максимова С.Е. [10], а также многими другими, что свидетельствует о высокой актуальности и научной значимости темы.

Указанные исследования продемонстрировали значительную эффективность применения алгоритмов оптимизации при проектировании

маршрутов ОВД и стали важным стимулом для дальнейших разработок в данной области. Однако в настоящее время не представлено работ, посвящённых всестороннему проектированию полноценной сети маршрутов ОВД, в которых в полном объёме учитывались бы практические ограничения, такие как параметры ВП, требования обеспечения БП и эксплуатационные условия. Это выявляет существенный научный пробел, заключающийся в необходимости разработки комплексной модели оптимизации, способной учитывать многомерную сложность проектирования всей сети маршрутов при реальных условиях эксплуатации. Такая модель могла бы служить основой для планирования более безопасных, эффективных и экономически обоснованных маршрутов ОВД, обеспечивая системный подход к ОрВД.

Особое внимание заслуживает тот факт, что разработка моделей ремаршрутизации в случае недоступности основных маршрутов ОВД до настоящего времени недостаточно изучена. Большинство существующих исследований сосредоточено на корректировке траекторий полётов ВС. Этот пробел подчёркивает перспективное направление научных исследований, направленное на создание продвинутой модели оптимизации, способной автоматически определять альтернативные маршруты ОВД на различных этапах ОрВД – стратегическом, предтактическом и тактическом. Особое значение имеет тактический уровень, где необходимо одновременно учитывать эксплуатационные ограничения и обеспечивать достижение конкретных показателей эффективности, таких как минимизация задержек, оптимизация ИВП и повышение БП. Разработка такой модели позволит повысить адаптивность и устойчивость системы ОрВД к неожиданным ситуациям, а также повысить общую эффективность функционирования системы.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является структура верхнего ВП с высокой интенсивностью полётов и сеть маршрутов ОВД.

Предметом исследования является методы повышения ПС верхнего ВП, модель и алгоритм оптимизации сети маршрутов ОВД.

Целью научного исследования является оптимизация структуры ВП с высокой интенсивностью с целью повышения ПС, эффективности ИВП и обеспечения БП.

Задачи научного исследования

Для достижения поставленной цели исследования были поставлены и решены следующие научные задачи:

- анализ состояния сети маршрутов ОВД в условиях высокой интенсивности полётов (на примере ВП районного диспетчерского центра (РДЦ) Хошимина), с выявлением основных проблем перегрузки, подтверждённых статистическими данными, а также недостатков существующей структуры;
- разработка комплекса мер по повышению ПС верхнего ВП (перераспределение секторов, применение AMAN/DMAN и другие методы) и выявление потребности в оптимизации сети маршрутов ОВД, выступающей ключевым элементом повышения эффективности функционирования системы;
- разработка оптимизационной модели сети маршрутов ОВД с целью повышения ПС и оптимизации ИВП на основе исходных данных и действующих ограничений;
- проведение компьютерного моделирования с использованием разработанной модели для оценки эффективности оптимизированной сети маршрутов ОВД;
- разработка модели оптимизационного выбора альтернативных маршрутных решений при ограничении или исключении применения основных маршрутов сети ОВД (ремаршрутизация);
- анализ результатов моделирования, оценка эксплуатационной пригодности предложенной модели и формулирование рекомендаций по её применению в практике ОрВД.

Методы исследования

Методы и методологическая основа исследования, применяемые в диссертации:

- статистический подход – включает сбор, систематизацию и обработку данных с целью выявления закономерностей и обобщения информации;
- аналитико-синтетический метод – предполагает всесторонний анализ и синтез информации и документов, а также оценку их содержательной ценности для выявления проблемных областей и формирования теоретических оснований решения задач;
- логический метод – основан на принципах строгого рассуждения, позволяющих формулировать выводы на основе имеющихся фактов и доказательств;
- метод имитационного моделирования – охватывает разработку и тестирование программных средств для оптимизации маршрутов ОВД, включая динамический поиск альтернативных оптимальных маршрутов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит:

1. Предложен комплекс мер по повышению ПС ВП в условиях высокой интенсивности полётов (на примере ВП РДЦ Хошима).
2. Разработана модель оптимизации сети маршрутов ОВД, включающая математическую модель, а также обоснованный выбор входных данных и оптимизационного алгоритма, предназначенная для улучшения ПС и оптимального ИВП, учитывающая определённые ограничения.
3. Предложены варианты организации ИВП, основанные на результатах оптимизационной модели. Каждый вариант был детально проанализирован с точки зрения его преимуществ и недостатков, что позволило выбрать наиболее оптимальный вариант. Выбранный вариант подвергся дальнейшему анализу с целью разработки эксплуатационного плана и его практической реализации.
4. Разработана модель динамической ремаршрутизации, позволяющая определять альтернативные оптимальные маршруты в случае перегрузки или недоступности основных маршрутов ОВД.
5. Эффективность разработанной модели оценивается посредством сравнения её результатов с реальными данными. Разработаны рекомендации по

практическому применению модели в системах ОрВД, включая метод формирования «playbook routes¹», интеграцию в автоматизированные системы ОрВД и использование в других приложениях.

Практическая значимость исследования

1. Комплекс мер по повышению ПС ВП может применяться в диспетчерских центрах с высокой интенсивностью полётов для снижения перегрузки, уменьшения нагрузки на авиадиспетчеров и повышения БП.

2. Разработанная модель обеспечивает научно обоснованный подход к оптимизации сети маршрутов ОВД, что позволяет повысить ПС ВП и БП.

3. Разработанная модель динамической ремаршрутизации для поиска альтернативных оптимальных маршрутов применима на стратегическом, предтактическом и тактическом этапах ОрВД, что обеспечивает гибкость УВД в различных эксплуатационных ситуациях.

4. Сформирован план рационального и научно обоснованного ИВП, обеспечивающий создание эффективной и упорядоченной сети маршрутов ОВД на основе результатов, полученных с использованием оптимизационных моделей.

5. Обоснование эксплуатационной применимости разработанных моделей оптимизации сети маршрутов ОВД и ремаршрутизации и формулирование рекомендаций по их практическому применению в системе ОрВД.

На защиту выносятся

1. Результаты анализа состояния ВП с высокой интенсивностью полётов (на примере ВП РДЦ Хошмина до октября 2023 г.), выявленные достоинства и недостатки существующей структуры ВП.

2. Разработанный комплекс мер по повышению ПС ВП, основанный на перераспределении секторов ОВД, применении систем АМАН/ДМАН и использовании современных средств наблюдения.

¹ Playbook routes – это набор стандартных маршрутов ОВД, которые ОВД может использовать в определенных обстоятельствах, когда основной маршрут недоступен. Эти маршруты созданы для обеспечения возможности быстрого внедрения по мере необходимости.

3. Разработанный метод оптимизации сети маршрутов ОВД и ремаршрутизации, основанная на алгоритме A-star, учитывающая выбранные входные данные, ограничения и логику оптимизационного процесса.

4. Результаты оптимизации сети маршрутов ОВД и альтернативных маршрутов в ряде гипотетических сценариев, соответствующих заданной целевой функции и ограничительным условиям.

5. Анализ результатов моделирования оптимизированной сети маршрутов ОВД с формированием плана её использования и последующей оценкой эксплуатационной пригодности разработанной модели.

6. Рекомендации по практическому применению разработанных моделей в системе ОрВД.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в разработке метода оптимизации сети маршрутов ОВД и ремаршрутизации при недоступности основных маршрутов, проведении анализа построенной модели оптимизации, в результате которого получены новые данные об оптимальной сети маршрутов ОВД и альтернативных маршрутах для основных маршрутов в конкретных сценариях и ситуациях, а также в формулировании выводов и практических рекомендаций, применимых для ОрВД с целью повышения ПС, эффективности эксплуатации и БП.

Достоверность и обоснованность

Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным применением математических методов для оценки эффективности разработанных алгоритмов, методов и методик, проведением сравнительного анализа результатов моделирования с реальными данными системы ОрВД, а также формулированием рекомендаций по её применению в практике системы ОрВД, что обеспечивает объективную оценку эффективности и способствует оптимизации модели.

Корректным использованием известных теоретических методов, статистической теории, современных методов математического и компьютерного моделирования.

Кроме того, предлагаемые планы по совершенствованию существующей ОрВД построены с учётом фактического развития науки и техники, рекомендаций и правил ИКАО, а также руководящих органов.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 8 печатных работах общим объёмом 124 страницы, в том числе: 3 научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (по транспорту) (57 страниц) [14–16]; 2 научные статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (34 страницы) [17 - 18]. Результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на международных конференциях: «Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы» [19], «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации – 2023» [20], «International Symposium On Aircraft Technology, MRO & Operations – 2024» [21].

Кроме того, ряд других исследований, связанных с диссертацией, также были представлены, в следующих изданиях: 1 статью в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (10 страницы) (по транспорту) [22]; 1 статью на международной конференции «International Symposium On Aircraft Technology, MRO & Operations – 2024» [23]; 1 статьи в научном журнале «Journal of Aviation Science and Technology» [24]; 1 научную статью в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (19 страниц) [25].

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, перечня сокращений и приложений. Общий объём работы вместе с приложениями составляет 179 страниц. Основная часть включает 171 страницу, 60 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 100 наименований. Общий объём приложений составляет 8 страниц и включает 2 приложения.

Глава 1. Теоретические основы проектирования организации воздушного пространства

1.1. Основные концепции организации воздушного пространства

Воздушное пространство. В воздушном праве – часть территории (пространство) государства, расположенное над его сухопутной и водной территорией (в том числе внутренними водами и территориальным морем). Боковая граница национального ВП представляет собой участок вдоль сухопутной и морской границ. Национальное ВП будет включать в себя все ВП до внешней границы земной атмосферы – начала космического пространства, регулируемого другими правилами. ВП принадлежит полному и исключительному суверенитету страны. Иностранные ВС, желающие работать в ВП страны, должны получить согласие этой страны при определенных условиях и процедурах и соблюдать законы этой страны.

Воздушное пространство ОВД. ВП определенных размеров с буквенным обозначением, в пределах которого могут выполняться конкретные виды полётов, и для которого определены ОВД и правила полётов [26].

Структуризация ВП и ОрВП [27]

Весь ВП рассматривается как объект ОрВД и как общий эксплуатационный ресурс. Его структурирование, адаптивное распределение и ИВП формируются на основе принципов равного доступа и недискриминационного использования. В связи с этим любые ограничения, вводимые в отношении эксплуатации конкретных участков ВП, носят исключительно временный характер. Организация и структуризация ВП осуществляется таким образом, чтобы обеспечить поддержку как существующих, так и потенциальных новых форм ИВП, включая, в частности, операции беспилотных летательных аппаратов и транзитное движение космических аппаратов. Процессы структуризации ВП реализуются на

глобальном уровне с одновременным учетом вопросов государственного суверенитета. При этом необходимо стремиться к максимально эффективному сокращению числа однотипных районов ОрВД и/или участков маршрутов, путем детального анализа целесообразности объединения смежных районов. Стратегическое планирование функционального использования конкретного района осуществляется взаимодействующими и заинтересованными сторонами сообщества ОрВД. Тактические изменения в пределах отдельного района ВП возлагаются на поставщика аэронавигационного обслуживания, который несет полную ответственность за организацию соответствующего ВП.

Координация планирования между смежными районами осуществляется с целью формирования непрерывного континуума ВП. В пределах данного континуума ВП будет обеспечивать отсутствие эксплуатационных разрывов и несоответствий. При проектировании структуры ВП учитываются интересы различных групп пользователей с учётом временной динамики. Перемещение пользователей между районами осуществляется беспрепятственно и может происходить в любой момент временной шкалы.

Рациональная структуризация ВП в сочетании с продуманной ОрВП формирует надёжную основу для управления ПКС. Эффективные методы структурирования и ОрВП значительно расширяют возможности поставщиков аэронавигационного обслуживания и пользователей ВП в профилактике, обнаружении и разрешении конфликтов, одновременно повышая уровень БП, ПС ВП, эксплуатационную устойчивость и общую эффективность системы ОрВД.

Функция ОрВП содействует формированию стратегий, регламентов и процедур, с помощью которых устанавливаются параметры ОрВП для различных видов авиационной деятельности, интенсивности движения, а также уровней обслуживания и правил поведения. Подходы к структурированию применимы как к наиболее загруженным участкам ВП, так и к зонам с низкой нагрузкой.

Структура ВП формируется на основе принципа полной ОрВП, при котором любая соответствующая деятельность внутри ВП становится известной системе ОрВД в той или иной степени.

Организация ВП: Под ОрВП понимается систематический процесс, в ходе которого определяются оптимальные варианты структуры ВП и внедряются различные методы предоставления услуг, направленные на наиболее полное удовлетворение потребностей пользователей ВП. Существование противоречащих интересов в ИВП делает ОрВП особенно сложной задачей, требующей процедуры, обеспечивающей равновесное учёты этих интересов.

Цель ОрВП: Конечная цель ОрВП – добиться наиболее эффективного ИВП исходя из реальных потребностей и, по возможности, избежать постоянной сегрегации ВП при оптимизации производительности сети. Удовлетворение требований к ОрВД для повышения БП, защищенности, ПС, эффективности, экологической устойчивости и суверенитета зависит от эффективной координации между ГА и государственной авиацией.

Маршрут ОВД [26]

Установленный маршрут, который предназначен для направления потока движения в целях обеспечения ОВД.

Маршрут ОВД определяется маршрутными техническими требованиями, которые включают индекс маршрута ОВД, линию пути до основных точек (точек пути) или в обратном направлении, расстояние между основными точками, требования в отношении передачи донесений, а также, по решению соответствующего полномочного органа ОВД, самую нижнюю безопасную абсолютную высоту.

1.2. Общий процесс проектирования организации воздушного пространства и маршрутов обслуживания воздушного движения

В соответствии с рекомендациями ИКАО, представленными в Док 9992 [28], процесс проектирования и внедрения ВП включает четыре этапа: планирование, разработку, апробацию и внедрение. Эти этапы объединяют 17 шагов (рисунок

1.1), формирующих целостный подход к созданию структуры ВП. ОрВП инициируется в ответ на появление новых или изменяющихся эксплуатационных требований и направлена на повышение БП, ПС и эффективности эксплуатации, а также на минимизацию воздействия на окружающую среду и достижение других эксплуатационно-организационных целей.

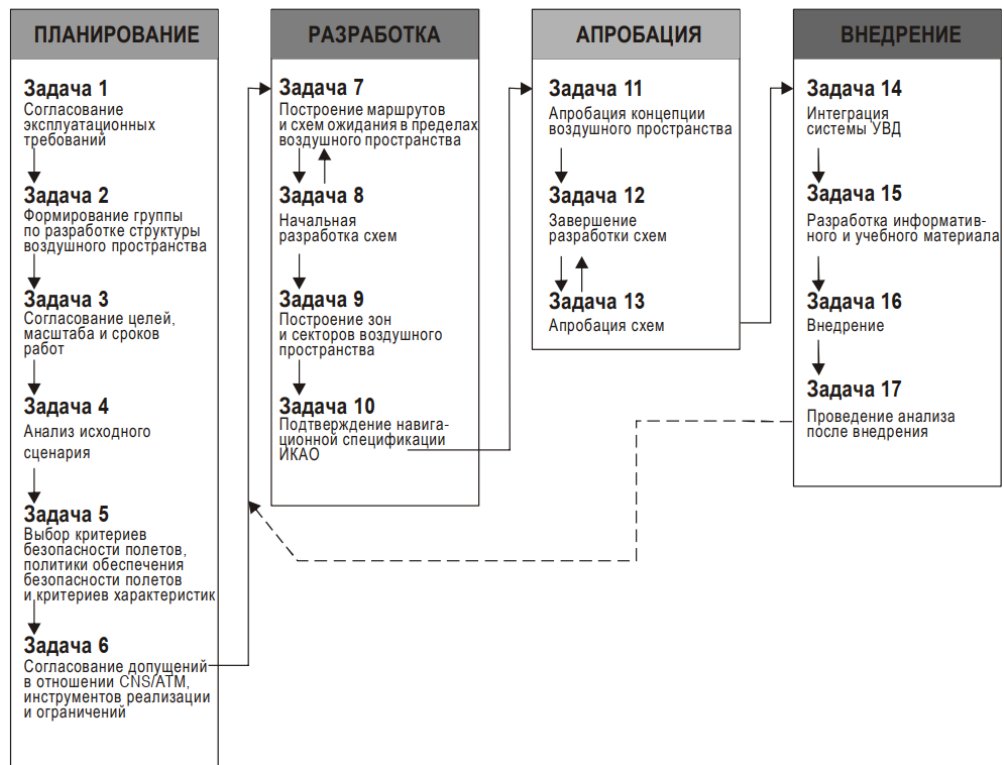


Рисунок 1.1. Процесс разработки и внедрения концепции ВП [28]

Кроме того, по мнению Горбенко М. [29], при проектировании ОрВП могут рассматриваться некоторые показатели оценки их эффективности, в частности:

- показатель δ неортодромичности маршрутов движения для потоков ВС в зоне управления воздушным движением (УВД); [29]
- показатель Q общего расхода авиационного топлива всеми ВС в зоне УВД в течение анализируемого периода времени (месяца пик); [29]
- показатель E ожидаемого количества ПКС в точках схождения и пересечения маршрутов в часы пик в зоне УВД с разбивкой по секторам УВД; [29]
- показатель N загруженности секторов УВД по количеству ВС одновременно на управлении в часы пик; [29]

- показатель CR риска столкновений ВС (в единицах катастроф на лётный час) в зоне УВД в целом и на отдельных элементах ВП (смежные эшелоны полёта (ЭП), параллельные маршруты, точки пересечения маршрутов и т.п.); [29]

- показатель η общего количества секторов в анализируемой зоне УВД, при котором ОВД возможно без нарушения установленных нормативов ПС секторов УВД в часы пик. [29]

Дополнительно для оценки эффективности ОрВП при сопоставлении различных вариантов ОрВП могут применяться следующие показатели:

- общее количество точек схождения и пересечения маршрутов ВС;
- количество точек, имеющих два или более сходящихся потоков с изменяющимся профилем полёта;
- количество точек, характеризующихся участием трёх и более секторов УВД в формировании интервалов движения;
- количество и протяжённость маршрутов ОВД, характеризующихся двусторонним движением и переменным профилем полёта;
- количество участков маршрутов ОВД или траекторий движения ВС, а также точек пересечения и схождения маршрутов, загруженность которых ВС в часы пик достигает порогового значения, близкого к их ПС;
- удельное количество точек пересечения и схождения маршрутов, в которых по оценкам экспертов сложность работы диспетчера в часы пик достигает уровня, когда при формировании интервалов расхождения ВС возникает угроза принятия решения о назначении неустановленного маршрута или неустановленной (промежуточной между ЭП).

В конечном итоге, при проектировании схем и маршрутов ОВД необходимо соблюдать некоторые основные принципы [30, 31]:

- *безопасность полётов*: Все маршруты ОВД должны быть безопасными и соответствовать отраслевым стандартам и правилам;
- *пропускная способность*: ВП должно позволять наилучшим образом использовать существующую ПС системы ОрВД в частности и авиации в целом в соответствии с политикой правительства;

- *гибкость и адаптивность*: ВП должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечивать возможность изменений маршрутов ОВД в случае необходимости (например, в экстренных ситуациях, при изменениях погодных условий или для оптимизации трафика). Это также включает возможность динамического управления секторами в зависимости от загрузки и потребностей;
- *учёт военных и специальных зон*: Маршруты ОВД должны учитывать закрытые для ГА зоны (военные полигоны, ключевые объекты и временные ограничения, например, во время учений или мероприятий);
- *рабочая нагрузка*: Проектирование маршрутов ОВД должно учитывать когнитивную нагрузку диспетчеров и экипажей ВС, избегая чрезмерного усложнения схем движения. Чрезмерная плотность маршрутов или высокая частота изменений в управлении могут привести к росту вероятности ошибок и повышению уровня стресса у операторов системы ОрВД;
- *экологическая и акустическая устойчивость*: При проектировании ВП необходимо учитывать как сокращение выбросов, так и минимизацию шума. Это достигается путем выбора оптимальных маршрутов ОВД, которые, с одной стороны, позволяют снизить расход топлива и выбросы парниковых газов за счет более прямых и эффективных траекторий, а с другой — направляют ВД таким образом, чтобы уменьшить влияние авиационного шума на населенные пункты и чувствительные к шуму зоны;
- *экономическая эффективность*: Проектирование маршрутов ОВД должно учитывать затраты на эксплуатацию ВС, включая расход топлива, временные затраты на перелёты и логистику авиакомпаний. Оптимальные маршруты позволяют снизить эксплуатационные расходы и сделать авиаперевозки более доступными;
- *технология*: Все проекты маршрутов должны основываться на новейших широко доступных авиационных навигационных технологиях;
- *резервные маршруты и решения*: Важной частью проектирования ВП является разработка резервных маршрутов и альтернативных решений на случай внештатных ситуаций.

1.3. Некоторые проекты, связанные с оптимизацией сети маршрутов обслуживания воздушного движения, осуществляемые на различных континентах мира

Изменение сети маршрутов ОВД в зоне ответственности некоторых РЦ ЕС ОрВД и кроссполярных и трансвосточных маршрутов в России [32, 33]

Этот проект направлен на оптимизацию маршрутов ОВД в соответствии с новой структурой ВП, которая стала основой для работы, в настоящее время проводимой в филиале «Аэронавигация Северо-Запада». Кроме того, проект предусматривает оптимизацию сети маршрутов ОВД для полётов по кроссполярным и трансвосточным маршрутам с целью выполнения транзитных рейсов, внедрение ВП свободной маршрутизации (FRA), а также планы по дальнейшему улучшению качества аэронавигационного обслуживания.

Внедрение новой структуры ВП в европейской части России [34, 35]

Новая структура ВП Московской зоны ЕС ОрВД вступила в действие 3 декабря 2020 года. Изменения затронули также смежные зоны — Санкт-Петербург, Ростов, Самару и Екатеринбург. Были введены полностью новые схемы вылета, прибытия и заходов на посадку, осуществлён переход на использование QNH и футов. Все маршруты ОВД в указанных зонах переведены исключительно на маршруты зональной навигации RNAV5, при этом «обычные» маршруты были полностью упразднены. Новая структура ВП в первую очередь охватывает SID, STAR и IAP, а также вносит отдельные изменения в запретные зоны и зоны ограничения полётов, при этом диспетчерские зоны класса С существенно не изменены. Внедрена технология Point Merge, предусмотрены независимые одновременные заходы на параллельные полосы аэропортов Шереметьево (UUEE) и Домодедово (UDDD), а также исключены транзитные потоки ниже ЭП285. В нижнем ВП в рамках новой структуры все местные воздушные линии были обновлены, практически все пятибуквенные точки оказались новыми и

расположены в других местах. Воздушные дороги постоянных правил были упразднены, а местные диспетчерские пункты изменили свои границы.

Предложение по оптимизации маршрутной сети ОВД для регионов Карибского бассейна и Южной Америки в 2020 году [36]

Задача оптимизации сети маршрутов ОВД в регионе Карибского бассейна и Южной Америки заключается в эффективном обеспечении полного перехода к PBN, путем внедрения оптимальных траекторий маршрутов. Многие предлагаемые маршруты ОВД PBN по-прежнему подключают устройства навигационного обеспечения, такие как VOR и DME. Еще одним важным аспектом этого процесса является придание приоритета региональной гармонии и сотрудничеству. Заинтересованным сторонам следует уделять приоритетное внимание обеспечению непрерывности ОВД и внимательно следить за изменениями за пределами своих регионов полётной информации (РПИ) и ВП.

В рамках этого проекта оптимизации было проанализировано 25 маршрутов ОВД с участием 10 стран и 13 РПИ для регионов Карибского бассейна и Южной Америки. К ним относятся удаление и изменение существующих маршрутов, а также внедрение новых маршрутов, вступающих в силу с 17 июня 2021 г.

Руководство по методологии проектирования ВП – Общие принципы и технические характеристики проектирования ВП в Европе, 2021 г. [37]

Документ имеет следующее основное содержание:

- общие основные принципы – определяют общие принципы создания и использования структур ВП и предоставляют рекомендации по гармонизации европейской классификации ВП;
- развертывание PBN – определяет основные элементы, которые проектировщик ВП должен учитывать при оперативном развертывании PBN;
- Европейский процесс координации – представляет европейские процессы, которые регулируют производство, изменение и утверждение элементов планирования и проектирования ВП;
- правила и доступность сети маршрутов и использования FRA – обеспечивает способ использования и доступности сети маршрутов и FRA;

- методология ОрВП и проектирования ТМА, маршрутов ОВД.

Целью сети маршрутов ОВД в Европе является улучшение возможностей ОрВД, улучшение летных характеристик и защита окружающей среды посредством создания усовершенствованной сети маршрутов ОВД в сочетании со структурной оптимизацией, а также правилами применения FRA.

Сеть маршрутов ОВД и FRA в регионе Африка – Индийский океан [38]

Регион Африка – Индийский океан сосредоточил внимание на планировании и реализации улучшения ПС ВП со следующими конкретными планами:

- *Генеральный план ОрВД*: продолжить совершенствование Генерального плана ОрВД AFI, документа концепции и концепции операций ОрВД (CONOPS);
 - *План действий в чрезвычайных ситуациях AFI по ОрВД*: завершить, разработать и информировать ИКАО;
 - *AFI FRA*: содействовать гармонизированной реализации AFI FRA в соответствии с установленными сроками;
 - *Внедрение PBN*: оптимизировать структуру маршрутов ОВД в ВП на маршруте и способствовать согласованному внедрению RNAV 5, RNP 4 и RNP 2;
 - *RVSM и эксплуатационная безопасность*: страны региона должны достичь цели AFI RVSM по безопасности ВП;
 - *Улучшенная реализация CCO/CDO*: улучшить дальнейшее внедрение CCO/CDO в поддержку PBN и способствовать гармонизированному подходу к реализации;
 - *Гражданское/военное сотрудничество и координация*: способствовать гармонизированному внедрению положений Руководства по гражданскому/ военному сотрудничеству в области ОрВД (ИКАО Doc 10088) в регионе AFI;
 - *Внедрение A-CDM*: способствовать внедрению A-CDM.

Текущий статус исследований во Вьетнаме

За последние пять лет развитие оптимизации сети маршрутов ОВД во Вьетнаме не получило должного внимания, а за последние десять лет не проводилось крупных научных исследований, направленных на совершенствование данной системы. В результате существующая сеть маршрутов ОВД сталкивается с рядом серьезных проблем, включая перегруженность, недостаточную ПС и структурные ограничения, что оказывает негативное влияние на эффективность ВД и снижает общую БП. Это подчеркивает необходимость разработки эффективной программы оптимизации, которая сможет улучшить ситуацию в ВП страны и повысить эффективность движения ВС на сети маршрутов ОВД.

1.4. Структура воздушного пространства района полётной информации Хошимина (Вьетнам)

В ВП Вьетнама входят, в том числе, РПИ Ханоя (VVHN) и РПИ Хошимина (VVHM), общей площадью 1,2 миллиона квадратных километров. Эти два ВП с маршрутами с относительно высокой плотностью полётов, занимают важное место для выполнения полётов над Восточным морем и Азиатско-Тихоокеанским регионом. ИКАО констатировала значительный рост насыщенности конкретных маршрутов ОВД и ВП в целом по Азиатско-Тихоокеанскому региону, особенно во Вьетнаме [39, 40], и представила рекомендации по совершенствованию ОрВП и перепроектированию ВП. Это делает организацию и перепроектирование ВП приоритетной и ключевой задачей. Однако среди двух РПИ во Вьетнаме РПИ Хошимина демонстрирует признаки серьезной перегрузки, что требует немедленной разработки предложений по увеличению ПС и оптимизации ВП.

ОрВД в ВП РПИ Хошимина включает: 1 районный диспетчерский центр (РДЦ) Хошимина, 3 терминальные зоны маневрирования (ТМА) в 3

международных аэропортах: Дананг, ТСН, Камрань, и 14 диспетчерских зон (*TWR (аэродромный диспетчерский пункт)*) в 14 аэропортах. Поскольку цель настоящего исследования состоит в оптимизации маршрутов ОВД, основное внимание в работе уделяется изучению деятельности ВП РДЦ Хошимина.

Организационная структура и разделение секторов в ВП РДЦ Хошимина

Вертикальная граница ВП

От поверхности земли/воды до неограниченной высоты, за исключением ТМА ТСН, ТМА Дананг, ТМА Камрань и TWR в РПИ Хошимина.

Боковая граница ВП (рисунок 1.2)

Боковая граница ВП определяется девятью точками и границей Вьетнама с соседними государствами, как показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Координаты границы ВП РДЦ Хошимина

точка	Долгота – Широта
(1)	10 ⁰ 22'00" северной широты - 103 ⁰ 44'00" восточной долготы
(2)	09 ⁰ 00'00" северной широты - 102 ⁰ 40'00" восточной долготы
(3)	07 ⁰ 00'00" северной широты - 103 ⁰ 00'00" восточной долготы
(4)	07 ⁰ 00'00" северной широты - 108 ⁰ 00'00" восточной долготы
(5)	10 ⁰ 30'00" северной широты - 114 ⁰ 00'00" восточной долготы
(6)	16 ⁰ 40'00" северной широты - 114 ⁰ 00'00" восточной долготы
(7)	16 ⁰ 00'12" северной широты - 110 ⁰ 20'43" восточной долготы
(8)	15 ⁰ 24'44" северной широты - 108 ⁰ 42'16" восточной долготы
(9)	14 ⁰ 41'10" северной широты - 107 ⁰ 33'24" восточной долготы
	Проходит вдоль границ Вьетнама - Лаоса и Вьетнама - Камбоджи до точки 10 ⁰ 22'00" северной широты - 103 ⁰ 44'00" восточной долготы.

Разделение секторов в ВП РДЦ Хошимина

К октябрю 2023 года ВП РДЦ Хошимина включал 6 секторов (рисунок 1.2).

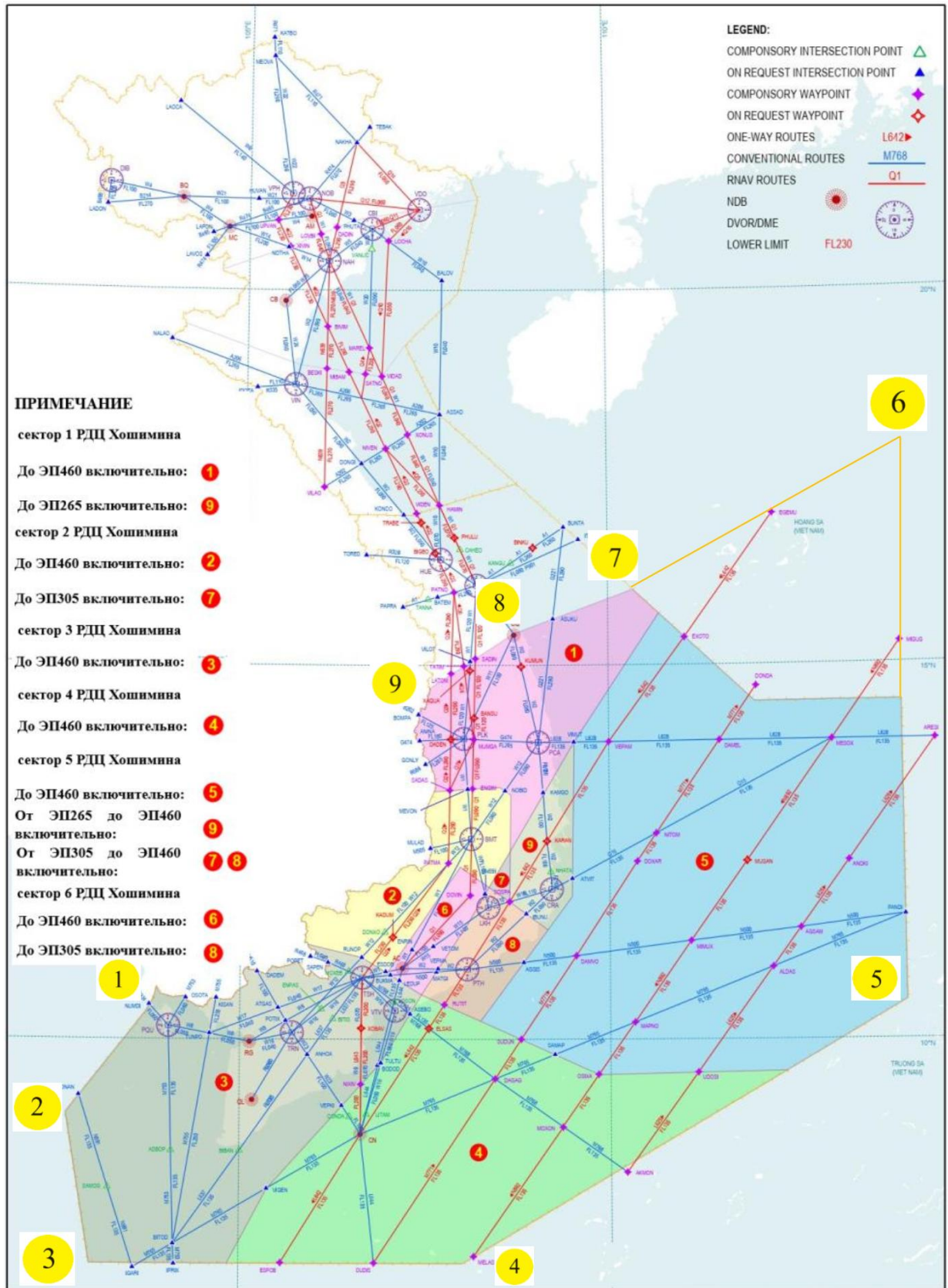


Рисунок 1.2. 6 секторов и границы ВП РДЦ Хошимина

- Сектор 1

Часть ВП, контролируемая с ЭП265 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: DN4 - SOSPA - D20 - D21 - VIMUT - D05 - D04 – NDB CQ - D02 - Вдоль границы Вьетнама и Камбоджи - D01 - E01 - D23 - D24 - DN4;

- вертикальная граница: от поверхности земли/воды до ЭП265 включительно, за исключением ВП ТМА Дананг, ТМА Камрань и TWR аэропортов в секторе.

Часть ВП, контролируемая с ЭП265 и выше:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D02 - NDB CQ - D04 - D05 - VIMUT - DN4 - D24 - D23 - E01 - D01 - Вдоль границы Вьетнама и Камбоджи - D02;

- вертикальная граница: с ЭП265 до ЭП460.

- Сектор 2

Часть ВП, контролируемая с ЭП460 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D01 - E01 - D23 - D24 - DN4 - E04 - E02 - E03 - RUNOP - D15 - Вдоль границы Вьетнама и Камбоджи - D01;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП460 включительно, за исключением ВП ТМА ТСН и TWR аэропортов в секторе.

Часть ВП, контролируемая с ЭП305 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: DN4 - SOSPA - E04 - DN4;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП305 включительно, за исключением ВП TWR аэропортов в секторе.

- Сектор 3

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D15 - RUNOP - E03 - D18 - TULTU - VIGEN - DN2 - Вдоль границы РПИ Хошимина и Сингапура - Вдоль границы РПИ Хошимина и Пномпеня - D15;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП460 включительно, за исключением ВП ТМА ТСН и TWR аэропортов в секторе.

- Сектор 4

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: DN2 - VIGEN - TULTU - D18 - D19 - OSIXA - D08 - Вдоль границы РПИ Вьетнама и Сингапура - DN2;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП460 включительно, за исключением ВП TWR аэропортов в секторе.

- Сектор 5

Часть ВП, контролируемая с ЭП460 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D05 - VIMUT - D21 - D20 - D19 - OSIXA - D08 - Вдоль границы РПИ Хошимина и Сингапура - Вдоль границы РПИ Хошимина и Манилы (114⁰⁰'00" восточной долготы) - Точка пересечения с линией 14⁰⁴'12" северной широты - Вдоль линии 14⁰⁴'12" северной широты - DONDA - EXOTO - D05 и сегментов полёта до точек ARESI, MIGUG, DONDA на маршрутах N892, L625, L628 и M771 разрешено выполнять полёты в ВП РДЦ Хошимина;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП460 включительно, за исключением ВП ТМА Камрань и TWR аэропортов в секторе.

Часть ВП, контролируемая от ЭП305 до ЭП460.

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: DN4 - SOSPA - D20 - D19 - D18 - DN7 - DN6 - E04 - DN4;

- вертикальная граница: От ЭП305 до ЭП460 включительно.

Часть ВП, контролируемая от ЭП265 до ЭП460:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: VIMUT - D21 - D20 - SOSPA - DN4 – VIMUT;

- вертикальная граница: От ЭП265 до ЭП460 включительно.

- Сектор 6

Часть ВП, контролируемая с ЭП460 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: E02 - E04 - DN6 - DN7 - D18 - E03 - E02;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП460 включительно, за исключением ВП в зоне ответственности TMA TCH и TWR аэропортов в секторе.

Часть ВП, контролируемая с ЭП305 и ниже:

- боковая граница: Представляет собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: E04 - SOSPA - D20 - D19 - D18 - DN7 - DN6 - E04;

- вертикальная граница: От земли/воды до ЭП305 включительно, за исключением ВП TWR аэропортов в секторе.

Маршрут ОВД в ВП РДЦ Хошимина (рисунок 1.3)

Маршруты ОВД подразделяются на два типа: международные маршруты, входящие в состав региональной сети ОВД, и национальные маршруты, которые не относятся к указанной региональной сети. Ширина маршрута ОВД устанавливается:

- 20 км (по 10 км в каждую сторону) - национальные маршруты ОВД;

- 30 км (по 15 км в каждую сторону) - международные маршруты ОВД;

- 92 км (по 46 км в каждую сторону) - международные маршруты ОВД в РПИ над международными водами, управляемые Вьетнамом.

Международные и национальные маршруты ОВД, выполняемые в ВП Хошимина:

- международные маршруты ОВД:

- маршруты, связывающие Хошимин с другими крупными городами и столицами в Юго-Восточной Азии, такими как Бангкок, Сингапур, Куала-Лумпур, Джакарта, Манила и Гонконг;

- маршруты, связывающие Хошимин с другими городами и столицами в Азии и Тихоокеанском регионе, например, Токио, Сеул, Пекин, Шанхай, Сидней и Мельбурн;

- маршруты, направленные в Европу, такие как Лондон, Париж, Москва, Франкфурт и Амстердам.

- национальные маршруты ОВД:

- маршруты, связывающие Хошимин с другими крупными городами и регионами во Вьетнаме, такими как Ханой, Дананг, Нячанг, Хюэ и Фантьет;

- маршруты, обслуживающие внутренний туризм и связывающие Хошимин с популярными туристическими направлениями во Вьетнаме, такими как Далат, Сапа, Хойан и остров Фукуок.

- маршруты RNAV

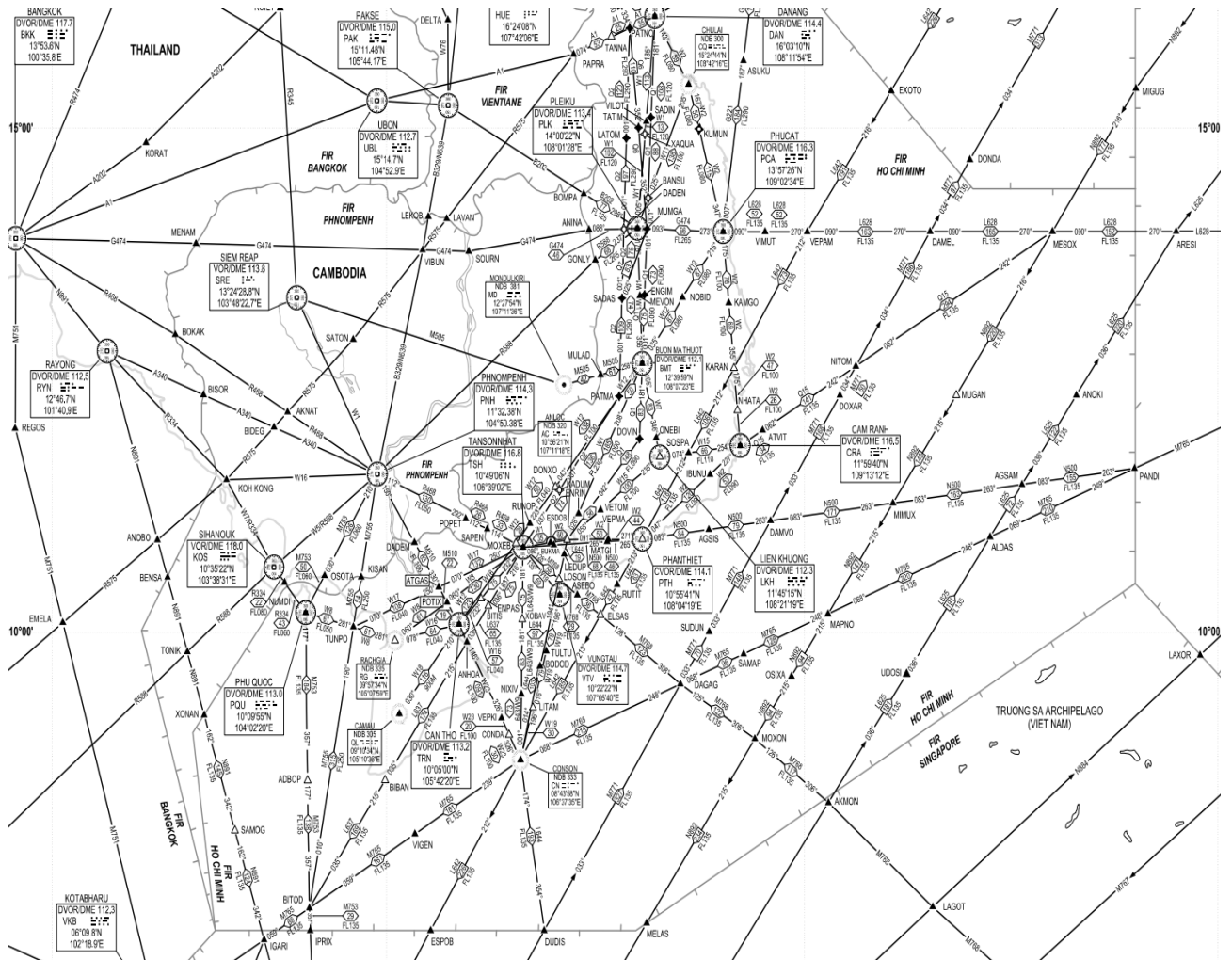


Рисунок 1.3. Маршруты ОВД и маршруты RNAV в ВП РДЦ Хошимина

Маршруты RNAV создаются при соответствующих обстоятельствах и условии оборудования ВС системами RNAV: GNSS, автоматические системы определения и коррекции местоположения ВС по DME, оборудование VOR/DME.

Другие зоны ВП

ВП Хошимина имеет 2 запретного зоны; 9 зон ограничения полётов; 32 опасного зоны (рисунок 1.4, 1.5).

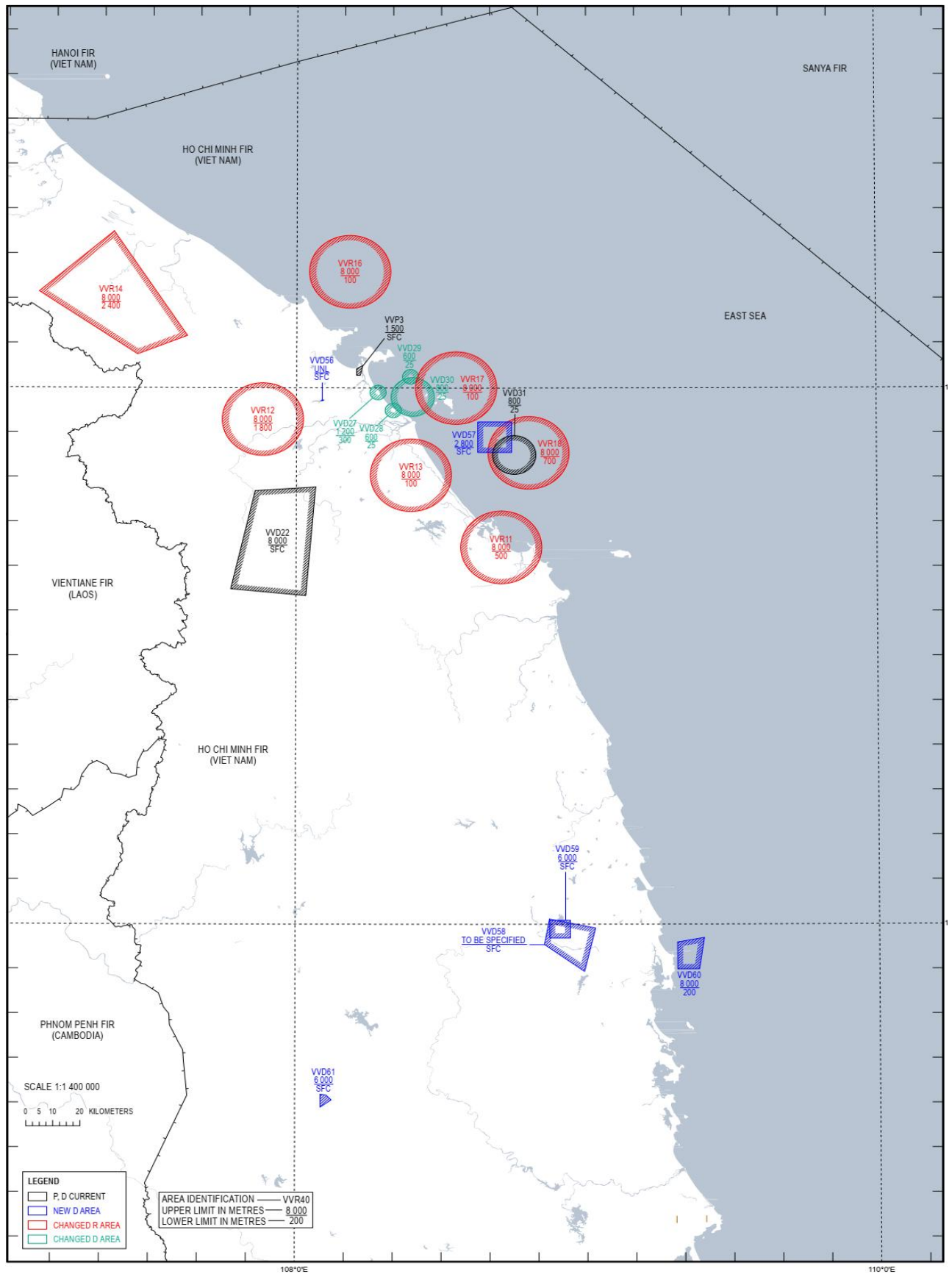


Рисунок 1.4. запретные зоны, зоны ограничения полётов, опасные зоны к северу
ВП Хошимина

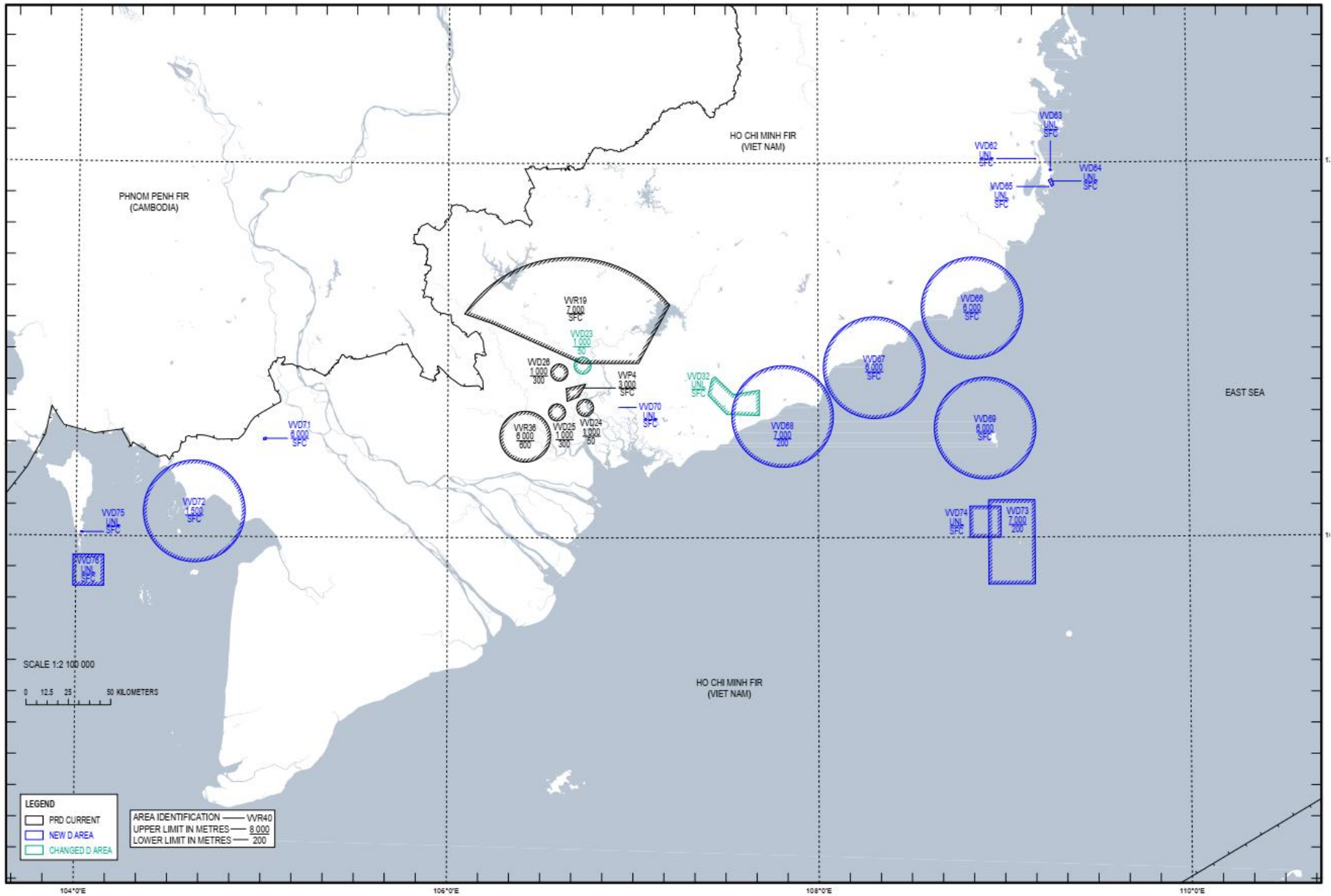


Рисунок 1.5. запретные зоны, зоны ограничения полётов, опасные зоны к югу ВП Хошимина

Преимущества и недостатки существующих 6 секторов в ВП РДЦ Хошимина

- Сектор 2 и Сектор 6

Сектор 2 в основном обслуживает исходящие потоки ВС, а сектор 6 обслуживает ВС, прибывающие в аэропорт ТСН. Такое разделение дает ряд преимуществ:

- сокращение времени радиообмена между авиадиспетчерами и пилотами;
- увеличение ПС ВП и взлётно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта ТСН;
- оказание помощи ВС для выполнения оптимальных рабочих траекторий, прогнозирование методов захода на посадку и посадки, что повышает безопасность и эффективность выполнения полётов, устранение перегруженности аэропорта ТСН.

ОрВП секторов 2 и 6 сталкиваются с некоторыми конкретными недостатками, а именно:

- выполнение полётов государственной авиации на аэродромах Бьенхоа и Фанранг влияет на полёты в секторах 2 и 6;
- ВП сектора 2 Буонметхуот (БМТ) достаточно напряженное, потому что в нём пересекаются 10 маршрутов ОВД, ВС часто меняют эшелон, поэтому нагрузка на авиадиспетчеров здесь очень высокая (рисунок 1.6);



Рисунок 1.6. Точка БМТ – место с высокой плотностью ВД

- граница сектора 5 (верхний ЭП) и сектора 6 (нижний ЭП) является ЭП305, что усложняет координацию действий между диспетчерами этих секторов;

- возникновение ПКС с другими секторами, ввиду ограничений в ВП и устаревших систем управления, что может привести к снижению БП.

- Сектор 1 и Сектор 5

Для сектора 1:

Применение RNAV 5 на двух параллельных основных маршрутах (Q1 – Q2) способствует увеличению ПС ВП сектора 1, обеспечивая безопасность, скоординированность и эффективность ИВП.

В секторе 1 ВС, выполняющие полёт с севера на юг, меняющие ЭП могут вступить в конфликт с другими ВС, выполняющими полёты с востока и северо-востока, которые снижаются для выполнения захода на посадку в аэропорт Камрань. Например, прибывающее в аэропорт Камрань ВС снижается с ЭП320 или ЭП360 по маршруту ОВД L642 до ЭП100. В то же время ВС, прибывающие в другие аэропорты от маршрута N500 до точки DAMVO, также используют четные ЭП. В результате часто возникают ПКС между ВС (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. Направление движения ВС в секторе 1 и 5 часто приводящие к ПКС

Для сектора 5:

Граница сектора 5 (верхний ЭП) и сектора 2 (нижний ЭП) является ЭП305 (расположенный между секторами 1, 2 и сектором 6 (рисунок 1.8), что усложняет координацию действий между диспетчерами этих секторов.

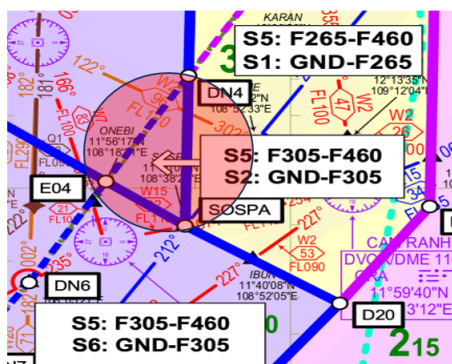


Рисунок 1.8. Треугольная зона, затрудняющая координацию между секторами 1, 2 и 6

Объем ВП сектора 5 составляет почти 40 % ВП РДЦ Хошимина, поэтому у него относительно высокая ПС. В этом секторе применяется RNP 10, что упрощает ОВД. Однако из-за обширной территории и удаленности от берега ИВП подвержено влиянию сложных метеорологических условий, ограниченной обзорности систем наблюдения ОВД и нестабильности работы навигационного оборудования.

- Сектор 3 и Сектор 4

Для сектора 3:

Объем ВП сектора 3 составляет около 20 % ВП РДЦ Хошимина, в котором осуществляется УВД ВС, вылетающими и прибывающими из шести внутренних аэропортов (ТСН, Кантхо, Ратьзя, Фукуок, Камау и Коншон) и РПИ Куала-Лумпур, Сингапур, Пномпень. В часы пик рабочая нагрузка на диспетчера УВД всегда высока.

В секторе 3 точка ВТОД может считаться «горячей» точкой (рисунок 1.9). Она является пересечением многих маршрутов ОВД, таких как L637, M765, M755, M753. ВС, которые следуют по этим маршрутам, могут вылетать или прибывать в

аэропорты сектора или выполнять транзитные полёты в соседние страны, поэтому нагрузка на диспетчеров в этом секторе всегда велика.

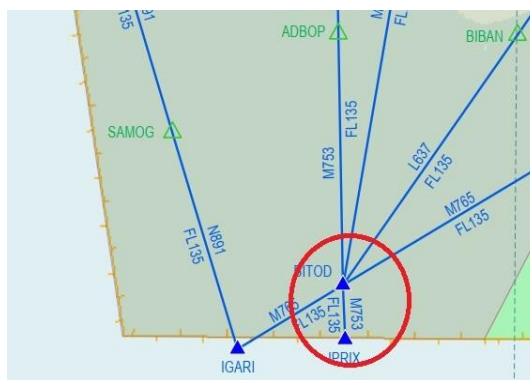


Рисунок 1.9. Точка ВITOD - точка с высокой плотностью ВД в секторе 3

Многие аэропорты, расположенные близко друг к другу (аэропорты ТСН, Кантхо и Ратьзя), что повышает вероятность возникновения ПКС при изменении ЭП ВС при выполнении взлетно-посадочных операций.

Для сектора 4:

Это сектор, который практически не имеет перегруженности ВП. Однако следует отметить некоторые проблемы, такие как:

- большая часть ВП сектора 4 расположена далеко в море, поэтому, как и у сектора 5, ИВП подвержено влиянию сложных метеорологических условий, которые вызывают некоторые трудности в обеспечении ОВД;

- в этом секторе эксплуатируются турбовинтовые ВС (ATR 72, ATR 42 и др.), которые по скоростным характеристикам уступают турбореактивным, что затрудняет их совместное использование в ВП сектора.

Ситуация в ИВП РДЦ Хошимина по состоянию на октябрь 2023 года

В добавлении II-C ИКАО Док 9971 [41] представлен подход к определению ПС сектора в РДЦ. Данная методика основана на процедуре, разработанной Федеральным авиационным управлением для оценки ПС сектора. Определение ПС сектора осуществляется на основе данных о среднем времени нахождения ВС в

пределах сектора (в минутах) в период с 07:00 до 19:00 с понедельника по пятницу в рамках любого 15-минутного временного интервала. В указанной соответствии с методикой, применительно к секторам ВП РДЦ Хошимина, получены результаты:

Таблица 1.2. ПС сектора в РДЦ Хошимина (упрощенная методика)

Сектор	Среднее время полёта в секторе	Оптимальное ограничение ПС в секторе за 15 минут
1	09	15
2	12	18
3	12	18
4	16	18
5	20	18
6	09	15

Оптимальное значение ПС подлежит адаптации с учётом уровня сложности сектора. Степень сложности сектора формируется под воздействием совокупности факторов, включая интенсивность ВД, структурную сложность маршрутов ОВД, размеры ВП как в горизонтальном, так и в вертикальном измерениях, особенности функционирования и организацию систем связи, навигации и наблюдения (CNS - Communications, Navigation, Surveillance), а также характер и специфику выполнения полётов государственной авиации и других пользователей ВП.

Согласно данным РДЦ Хошимина, в период с 22 по 24 июля 2023 г. в часы пик наблюдалась перегрузка секторов 1, 2, 3, 5 и 6 ВП, при этом наиболее критическая ситуация отмечалась в секторах 1, 3 и 5. В секторе 1 количество ВС в пиковые интервалы достигало 105–125% от оптимального значения ПС (таблица 1.2). Особенно напряжённая обстановка складывалась 23 июля в период с 10:30 до 11:00, когда число ВС достигло 126,67% оптимального значения ПС. Аналогично, в секторах 3 и 5 число ВС достигало 105–122% от оптимального показателя ПС.

Пиковые значения были зафиксированы в секторе 3 в период с 11:30 до 11:45 23 июля, а в секторе 5 – в интервалах с 10:45 до 11:00 и с 11:30 до 11:45 того же дня, составив 122,22% (подробности приведены на рисунке 1.10). Секторы 1 и 3 выполняют роль связующих коридоров между странами Юга (Сингапур, Малайзия и др.) и Севера (Китай, Россия и др.), а сектор 5 соединяет страны Запада (Таиланд, Камбоджа и др.) с Востоком (Япония, Корея и др.). Повышенная нагрузка на эти сектора приводит к задержкам и замедлению авиационного движения, что отрицательно отражается на экономическом развитии региона.

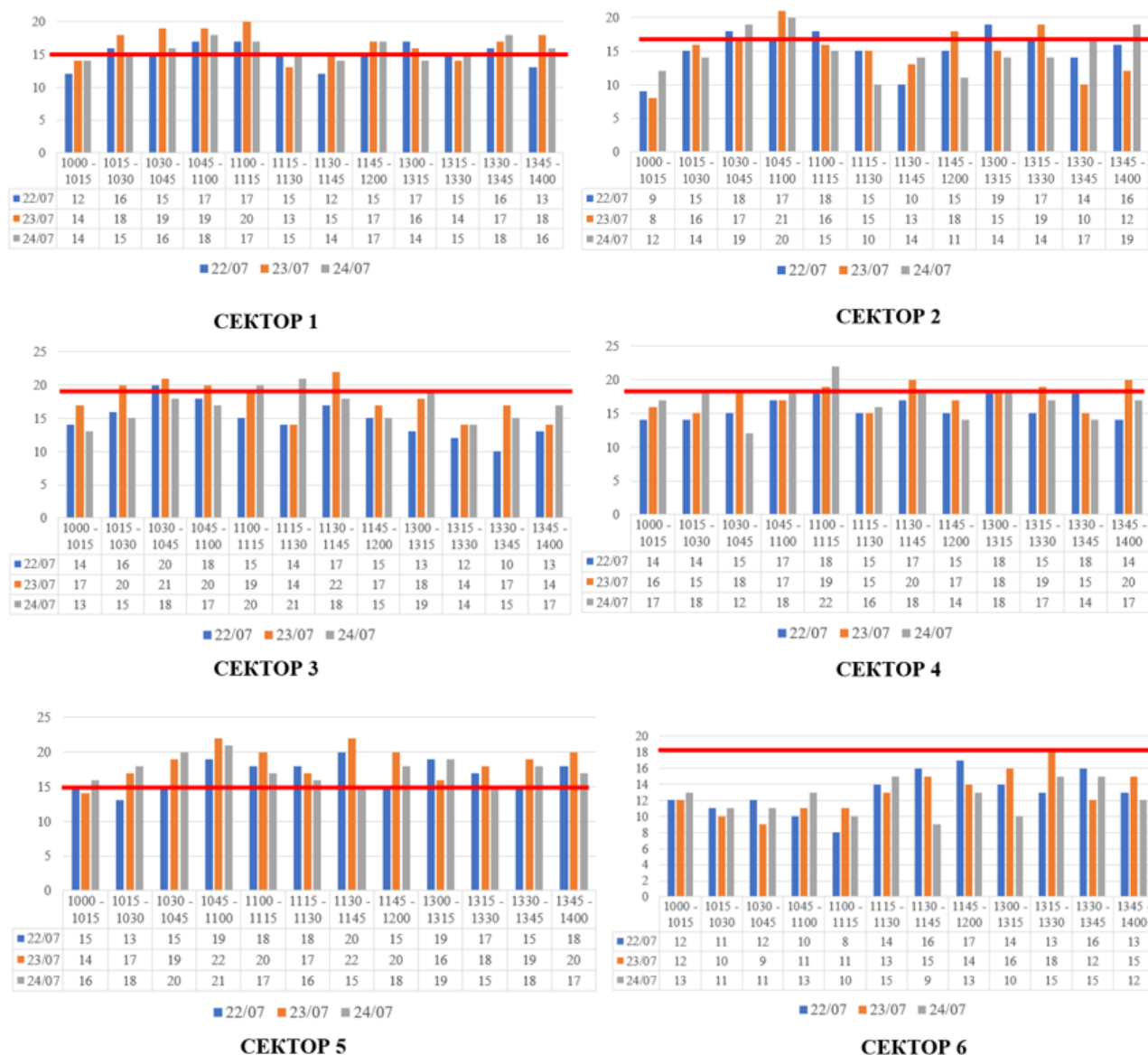


Рисунок 1.10. Интенсивность ВД по секторам РДЦ Хошимина с 22 по 24 июля 2023 г.

существенно повышает нагрузку на диспетчеров, которым приходится одновременно контролировать большое количество ВС, обеспечивая их безопасное эшелонирование и предотвращение конфликтных ситуаций. На рисунке 1.11 представлено изображение экрана радиолокатора УВД в ВП РДЦ Хошимина в условиях неблагоприятной погоды. Видно, что в таких условиях плотность ВД достигает предельных значений, вызывая перегрузку ВП и снижая ПС.

Помимо этого, в праздничные периоды наблюдается тенденция к увеличению числа ВС, что, как правило, повышает риск перегрузки ВП. Например, за 10 дней Лунного Нового года 2025 (с 25 января по 3 февраля 2025 года) Вьетнамская корпорация организации воздушного движения (VATM) контролировала выполнение 25328 рейсов, установив рекорд в 3 005 рейсов в день 25 января 2025 г., который стал днём с наибольшей интенсивностью ВД [96]. Особое внимание привлек международный аэропорт ТСН, где наблюдалась наивысшая интенсивность полетов: в период с 14 января по 12 февраля 2025 г. он обслужил 26 459 рейсов, приняв и отправив около 4 миллионов пассажиров. Из них 1,5 миллиона составили международные пассажиры, а 2,5 миллиона — внутренние, что на 6,5% превышает показатели 2024 года. Такая динамика роста привела к необходимости увеличения числа слотов до 48 рейсов в час в дневное время и до 46 рейсов в час в ночное время [97]. Таким образом, при значительном числе ВС и высокой интенсивности ВД диспетчеры, выполняя функции УВД в ВП РДЦ Хошимина, испытывают высокий уровень рабочей нагрузки, приближающийся к предельно допустимым нормам, что способствует возникновению стрессовых ситуаций.

Кроме того, в секторах 3 и 5 наблюдаются перегрузки радиосвязи в диапазоне VHF (*VHF — очень высокие частоты, от 30 до 300 МГц, соответствующие длинам волн от 1 до 10 метров*), что создаёт трудности при поддержании БП, оптимальной работы и непрерывного функционирования системы ОВД. Согласно методике оценки Eurocontrol [42], порог рабочей нагрузки (workload threshold) вычисляется как доля

времени, которую диспетчер тратит на ведение радиосвязи в течение одного часа. Значения порога, отражающие степень перегрузки, приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Порог рабочей нагрузки [42]

Порог	Интерпретация	Записанное рабочее время в течение 1 часа
70 % или выше	Перегрузка	42 минуты +
54 % - 69 %	Тяжелая нагрузка	32 - 41 минута
30 % - 53 %	Средняя нагрузка	18 - 31 минута
18 % - 29%	Лёгкая нагрузка	11 - 17 минут
0 % - 17 %	Очень Лёгкая нагрузка	0 - 10 минут

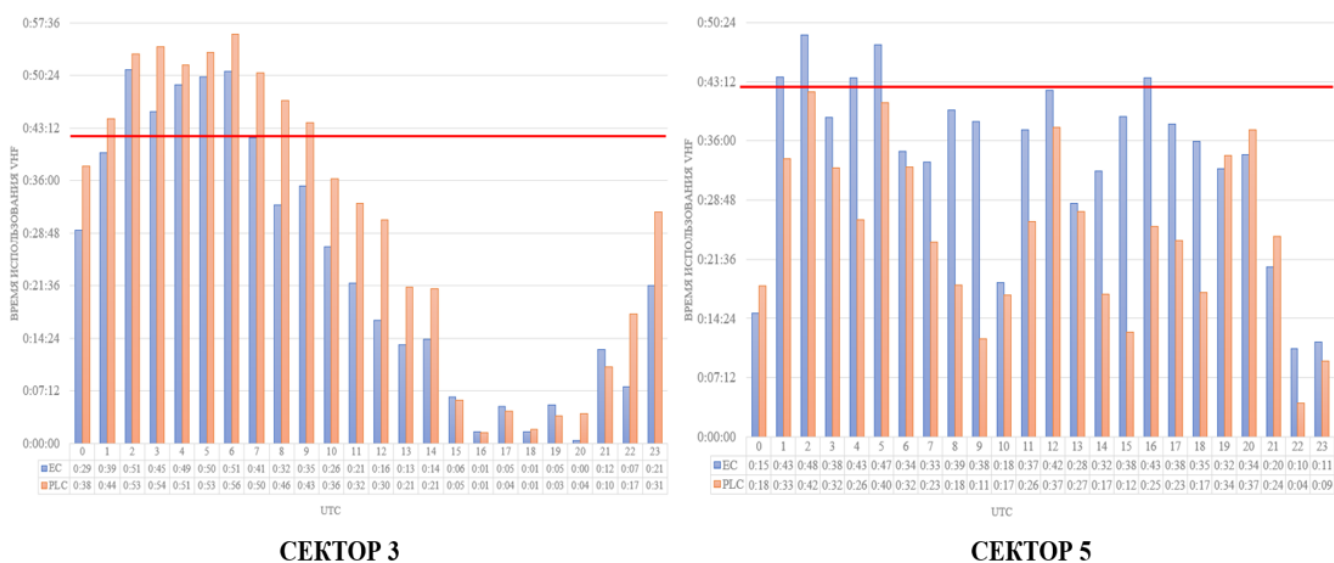


Рисунок 1.12. Время использования VHF на позиции Диспетчер радиолокационного контроля/Диспетчер процедурного контроля сектор 3 и 5, 1 июня 2023 г.

Например, согласно данным РДЦ Хошимаина, 1 июня 2023 года в секторе 3 диспетчер радиолокационного контроля (ЕС)/диспетчер процедурного контроля (PLC) превысили допустимый порог времени использования VHF (рисунок 1.12). В интервалах времени 02:00, 03:00, 04:00, 05:00, 06:00 и 07:00 UTC, особенно в 06:00

UTC, диспетчер радиолокационного контроля был вынужден поддерживать радиообмен с экипажами ВС на протяжении 51 минуты в течение часа для выполнения функций УВД, включая выдачу разрешений и инструкций. При этом у диспетчера оставалось всего 9 минут на анализ обстановки и принятие решений в нестандартных ситуациях. Аналогичная ситуация наблюдалась в секторе 5: хотя общий порог рабочей нагрузки ниже, некоторые интервалы времени всё же превышали допустимые значения. Например, в 02:00 UTC диспетчеру радиолокационного контроля пришлось вести радиообмен 48 минут в течение часа.

1.5. Предлагаемые меры по увеличению пропускной способности воздушного пространства районного диспетчерского центра Хошимина

Несмотря на внедрение современных научных и технологических решений, ВП Хошимина в целом и ВП РДЦ Хошимина в частности продолжают демонстрировать признаки перегрузки. Для решения данной проблемы предлагаются следующие меры, направленные на повышение потенциала улучшения ПС ВП, Повышение БП и уменьшение перегрузки авиадиспетчеров.

Предложение по разделению и реорганизации секторов в ВП РДЦ Хошимина

Перераспределение ВП секторов 3, 4, и создание сектора 7 в ВП РДЦ Хошимина

- Вариант 1:

Сектор 7 будет отвечать за ВП, которое будет иметь следующую форму (рисунок 1.13):

Вертикальная граница: будет распространяться от поверхности земли/воды до ЭП255 включительно, исключая ВП ТМА ТСН и ВП TWR аэропортов в секторе.

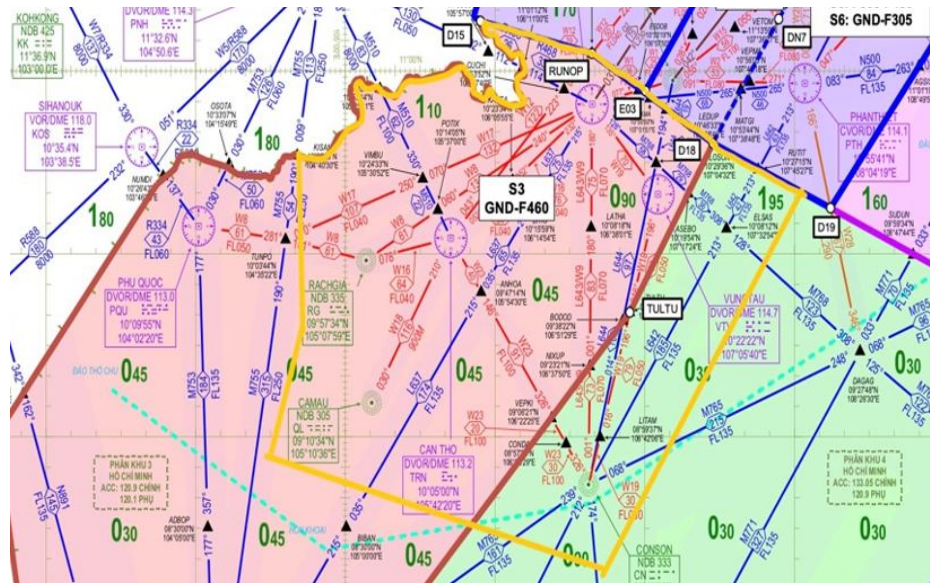


Рисунок 1.13. План создания сектора 7 путем продольного разделения сектора 3 (жёлтой линией выделена граница ВП сектора 7)

Боковая граница: будет представлять собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D15 - RUNOP - D18 - D19 - D25 - D26 - D27 - RG - D28 - вдоль границы ВП Хошимина и Пномпеня - D15.

После вышеуказанного разделения сектор 7 будет иметь границу, охватывающую все ВП аэропортов ТЧН, Кан тхо, Ратьзя, Ка Май и Кон Сон (не включая ВП TWR вышеуказанных аэропортов). Это означает, что ответственность за УВД на низком ЭП255 (где ВС будут выполнять манёвр перед посадкой и после взлёта) будет передана диспетчеру сектора 7, что снизит нагрузку на существующий сектор 3. В это время авиадиспетчеры сектора 3 будут контролировать:

- ВС снижающиеся с ЭП, с целью приближения к аэропортам в этом секторе (в частности в ВП вокруг аэропорта Фукуок и в районе точки пересечения воздушных трасс ВITOD, рисунок 1.9), после чего ответственность за управление будет передана диспетчеру сектора 7;

- ВС, следующие транзитом по маршрутам ОВД в секторе.

ВП сектора 4, после перераспределения и создания сектор 7, будет разделено на два соответствующих относительно небольших ВП следующим образом:

- часть ВП сектора 7 авиадиспетчеры сектора 4 будут контролировать на низких ЭП (от ЭП255 до ЭП460 включительно);

- что касается остального ВП, авиадиспетчеры сектора 4 будут контролировать от земли/воды до ЭП460 включительно.

- Вариант 2:

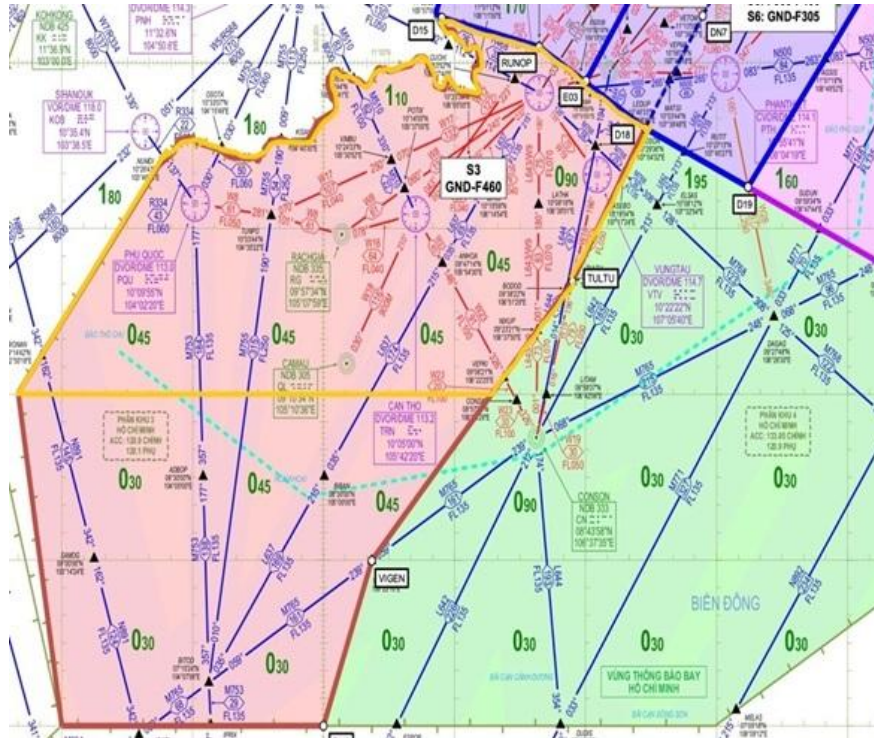


Рисунок 1.14. План создания сектора 7 путем горизонтального разделения сектора 3 (жёлтой линией выделена граница ВП сектора 7)

Второй вариант деления будет выполняться горизонтально, а не продольно, как в первом варианте. Сектор 7 будет включать ВП вокруг аэропортов ТСН, Фу Куок и Кан Тхо (рисунок 1.14). Диспетчеры сектора 3 будут отвечать за ОВД в ВП, включая два основных района, которые бывают часто перегружены: ВП вокруг аэропорта Кон Сон и в районе точки пересечения воздушных трасс ВТОД.

Целью данного вариант ОрВП является выделение авиадиспетчеров сектора 7 для ОВД на низких ЭП, где ВС выполняют маневры для захода на посадку и после

взлёта в аэропортах сектора. Авиадиспетчеры сектора 3 будут отвечать за ОВД в зонах подхода и ВС, следующие транзитом по маршрутам ОВД в секторе, поэтому рабочая нагрузка будет распределяться относительно равномерно между авиадиспетчерами этих секторов. В результате ВП сектора 7 будет распространяться от ЭП255 и ниже, а остальное ВП от ЭП255 и выше будет относиться к сектору 3.

При этом варианте ВП сектора 4 не изменится, однако авиадиспетчерам сектора 4 необходимо будет обратить внимание на координацию действий с авиадиспетчерами сектора 3 и вновь создаваемого сектора 7.

Перераспределение ВП сектора 5 и создание сектора 8 в ВП РДЦ Хошимина

Сектор 5 ВП РДЦ Хошимина отличается значительной площадью, что увеличивает нагрузку на авиадиспетчеров и снижает эффективность ОВД. Кроме того, в выходные дни и вечерние часы в этом секторе отмечается высокая плотность ВД. Разделение сектора 5 на два меньших сектора позволит повысить ПС ВП. В ближайшем будущем планируется реорганизация сектора 5 ВП РДЦ Хошимина, с формированием сектора 8 с целью:

- повысить эффективность ОрВП и уменьшить загруженность диспетчеров;
- увеличить ПС ВПП аэропорта ТСН;
- повысить качество ОВД в РДЦ Хошимина.

В настоящее время сектор 5 имеет 3 основных потока ВД, окончанием которых является посадка ВС в аэропортах ТСН и Камрань. Эти ВС выполняют полёты по маршрутам L642, Q15, N892. Для снижения нагрузки на диспетчеров, работающих на секторе 5, сектор 8 планируется реорганизовать, и в результате диспетчеры этого сектора будут отвечать за выполнение полётов ВС от ЭП255 и ниже, с целью выполнения взлетно-посадочных операций в аэропортах ТСН и Камране. Граница вновь создаваемого сектора отображена на рисунке 1.15.

Целью сектора 8 является управление маловысотными ВС, работающими на низком ЭП. Сектор 5 будут контролировать ВС с ЭП255 и выше в ВП

ответственности сектора 8. За оставшуюся часть ВП будет нести полную ответственность сектор 5 от поверхности земли/воды до ЭП460.



Рисунок 1.15. План создания сектора 8 (красной линией выделена граница ВП сектора 8)

Результаты оценки варианта 1 разделения сектора 7

Для оценки предложенного варианта 1 было проведено моделирование с использованием программы «Fast-Time Simulation study²».

Для измерения показателей рабочей нагрузки данные полётов (01 – 07 июня 2019 г. и 01 – 07 декабря 2019 г.) были использованы для моделирования потока ВД в модели AirTop³ по умолчанию «Общей рабочей нагрузки диспетчера УВД». По этим показателям было проведено сравнение двух ОрВП: нынешней ОрВП «Базовый уровень» (действующие секторы 3 и 4) и новой ОрВП «Тестовый уровень» (предлагаемые секторы 3, 4 и 7). Результаты измерений показывают, что количество операций передачи управления ВС между смежными секторами возросло:

- от базового уровня (в среднем 91 раз в день за июнь, 89 раз за декабрь);

² Fast time simulation [Электронный ресурс] // NLR.

URL: <https://www.nlr.org/capabilities/fast-timesimulation/#tab-id-1> (дата обращения: 11.05.2023)

³ AirTop – одна из двух платформ, используемых в программе Fast-Time Simulation study (Имитационное исследование в ускоренном режиме) ATMRI для оценки ПС ВП.

- в текстовом уровне (в среднем 240 раз в день в июне, 203 раза в декабре).

Несмотря на возрастание числа операций передачи управления, общая рабочая нагрузка диспетчера УВД (с учётом дополнительной нагрузки, связанной с операциями передачи управления) на тестовом уровне была снижена, так что рабочая нагрузка диспетчера УВД для предлагаемых секторов 3 и 4 меньше, чем для соответствующих существующих секторов (рисунок 1.16).

Также примечательно, что прибытие в среднем 91 рейса в день (в июне) или 89 рейсов (в декабре) в ТМА ТСН из этих южных секторов (Сингапура и Малайзии и т.д.) полностью переместится из действующего сектора 3 в предлагаемый сектор 7. В случае перегрузки при прибытии ВС в аэропорт ТСН диспетчерская смена сможет передать часть рабочей нагрузки действующего сектора 3 на предлагаемый сектор 7. Диспетчеры УВД секторов 3, 4 и 7 этого варианта, будут иметь больше времени для выполнения других задач (например, таких как: планирование изменения ЭП ВС, раннее обнаружение ПКС и т.д.). В результате ОВД в районе аэропортов и ВП региона, по мнению авторов, позволит обеспечить требуемую ПС и необходимый уровень БП.

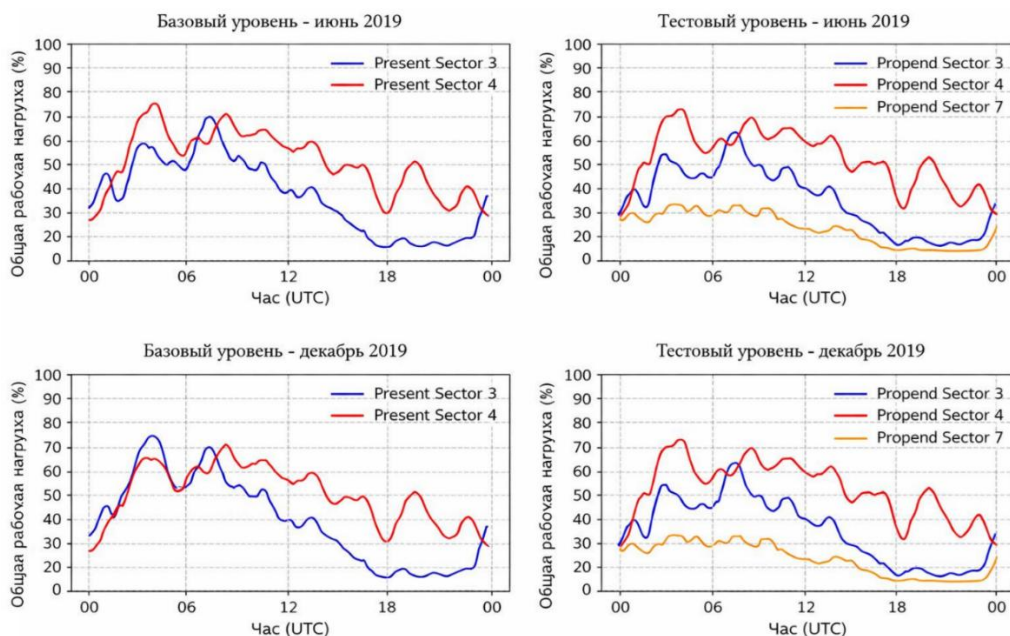


Рисунок 1.16. Результаты оценки варианта 1 по модели «Fast-Time Simulation study»

Деление по вертикали для сектора 1

Сектор 1 также перегружен в часы пик, однако, учитывая его относительно небольшую площадь, выделение нового сектора внутри него не представляется целесообразным и оптимальным. В связи с этим предлагается перераспределение сектора 1 по вертикали в часы пик. Возможны два варианта вертикального разделения: на две зоны – от земли до ЭП265 и от ЭП265 до ЭП460, либо от земли до ЭП285 и от ЭП285 до ЭП460.

Однако такое разделение может повлиять на предоставление ОВД в других ВП региона, включая ТМА Дананг, TWR Дананг, TWR Фубай и другие. В рамках данного исследования недостаточно данных и условий для детального рассмотрения этого варианта, поэтому более подробный план не представлен.

Применение систем AMAN/DMAN для поддержки ОрВД в аэропорту ТСН

Будучи самым крупнейшим аэропортом Вьетнама, аэропорт ТСН играет важную роль в системе ОрВД в ВП Хошимина. Однако это увеличило загруженность ВП в районе аэропорта ТСН, и в результате в аэропорту наблюдаются признаки перегрузки [43 – 45]. В данный момент пассажирская нагрузка в аэропорту ТСН стабильно остаётся высокой. Особенно в выходные дни аэропорт обслуживает свыше 100 000 пассажиров на прилёт и вылет в сутки, что соответствует примерно 600–700 прибывающим и отправляющимся ВС. Значительное число рейсов приводит к повышенной рабочей нагрузке на авиадиспетчеров, вынужденных постоянно работать в условиях стресса. Кроме того, интенсивные взлётно-посадочные операции вызывают перегрузку ВПП, рулёжных дорожек и ВП аэропорта ТСН, что негативно сказывается на уровне БП, регулярности и эффективности ВД.

Поэтому улучшение ПС аэропорта ТСН является главным приоритетом. Одной из оптимальных мер является применение AMAN/DMAN в аэропорту ТСН. Разработка и последующее внедрение систем AMAN/DMAN позволит авиадиспетчерам наиболее рационально организовывать очередность использования ВПП, оптимизировать потоки прилетающих и вылетающих ВС, а также снизить

степень перегруженности ВП и ВПП, по крайней мере на текущем этапе и в ближайшей перспективе.

Для аэропорта ТСН была разработана экспериментальная модель системы AMAN/DMAN [20], направленная на повышение эффективности организации потоков воздушного движения (ОПВД) при взлёте и посадке, снижение загруженности ВП и увеличение ПС. После инициализации программного обеспечения система отображает интерфейс с информацией о всех рейсах, прибывающих в аэропорт ТСН в радиусе 600 морских миль (по умолчанию) в реальном времени, с сортировкой по фактическому времени прибытия. Для рейсов, вылетающих из ТСН, если рейс ещё не совершил взлёт, данные вводятся диспетчерами вручную. Как видно на рисунке 1.17, последовательность рейсов организована хронологически и обеспечивает соблюдение интервала в одну минуту между вылетающими и прибывающими рейсами.

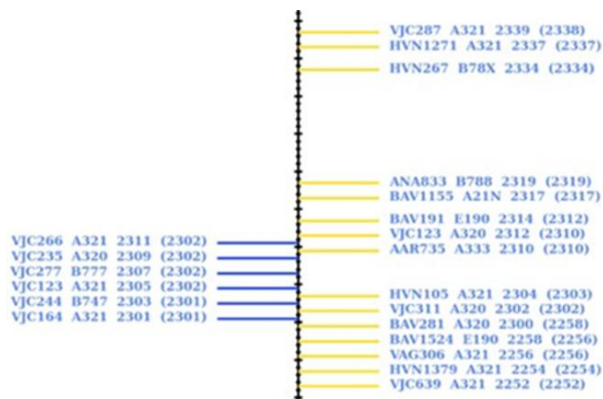


Рисунок 1.17. Распределение рейсов в программе

При возникновении сложных метеорологических условий, способных сократить ПС ВПП вдвое, программа выполняет перерасчет и актуализацию времени вылета и прибытия рейса (рисунок 1.18).

Сравнивая рисунки 1.17 и 1.18, видны изменения во времени взлёта и посадки, а также в последовательности рейсов. Например, время вылета рейса HVN267 скорректировано с 23:34 на 23:37, а рейс VJC266 временно не допущен к вылету.

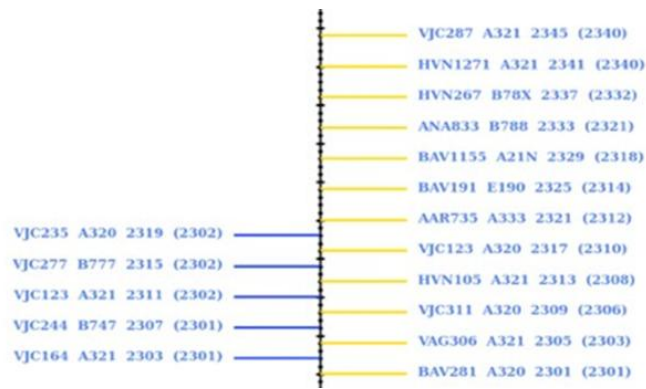


Рисунок 1.18. Перерасчет результатов при возникновении неблагоприятных погодных условий

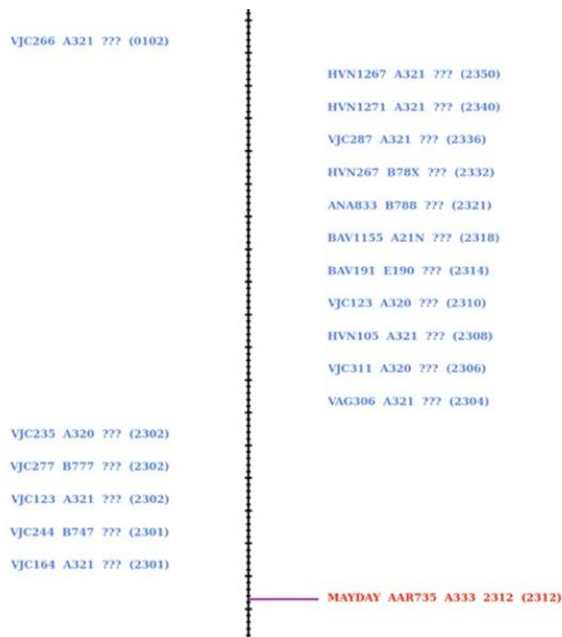


Рисунок 1.19. Отображение аварийной ситуации рейса в системе AMAN/DMAN

В случае необходимости аварийной посадки рейса программа отобразит результаты, как показано на рисунке 1.19. Например, если рейс AAR735 столкнулся с нештатной ситуацией, этому рейсу предоставляется приоритет на посадку. Остальные рейсы остаются на земле либо в зоне ожидания (holding point) и не получают разрешения на взлёт и посадку. Вследствие этого программа не выполняет расчёт и отображение времени для этих рейсов. На экране время взлёта или посадки

соответствующих рейсов обозначается символом «???», что сигнализирует о его неопределённости.

Увеличение применения современных систем наблюдения

В настоящее время в ВП Хошимина основной системой наблюдения является вторичный обзорный радиолокатор (ВОРЛ). Однако системы ВОРЛ имеют такие недостатки, как [46]:

- дифракция электромагнитных волн из-за расстояния и препятствий;
- ограниченное количество идентификационных кодов (4096);
- высота в режиме С измеряется с шагом 100 футов, что недостаточно для точного контроля, особенно при загруженном ВП. Желательно уменьшение шага до 20 футов;
- FRUIT: из-за работы на одной частоте (1090 МГц) наземная станция получает лишние сигналы от других ВС, что может создавать ложные отметки;
- Garble: накрадывающиеся сигналы приводят к ошибкам в данных. Увеличение частоты запросов лишь усиливает проблему;
- синхронные искажения: при пересечении двух ВС на малой высоте их сигналы мешают друг другу, затрудняя идентификацию дальних объектов;
- захват: пока ВС отвечает на один запрос, оно не может ответить на другой, снижая эффективность обнаружения. В режиме А или С транспондеру требуется до 120 мкс для обработки запроса.

Кроме того радиолокационные системы в ВП РДЦ Хошимина устаревшие, что приводит иногда к нестабильным сигналам, особенно в РПИ на море. Поэтому необходимо в кратчайшие сроки изучить возможность использования современных систем наблюдения (таких как ADS-B [47], MLAT [47], WAM [48]), которые способствуют повышению ПС ВП и обеспечению БП при предоставлении ОВД.

Автоматическое зависимое наблюдение – вещательное (ADS – B)

Сегодня ADS-B ИКАО определяется в качестве основного метода наблюдения. Однако с 2013 г. по настоящее время во Вьетнаме сфера применения ADS-B по-

прежнему ограничивается 8 маршрутами ОВД на ЭП290 и выше в ВП над Восточным морем в секторе 4 и 5: L625, M771, N892, L642, M765, M768, N500 и L628 (рисунок 1.20).

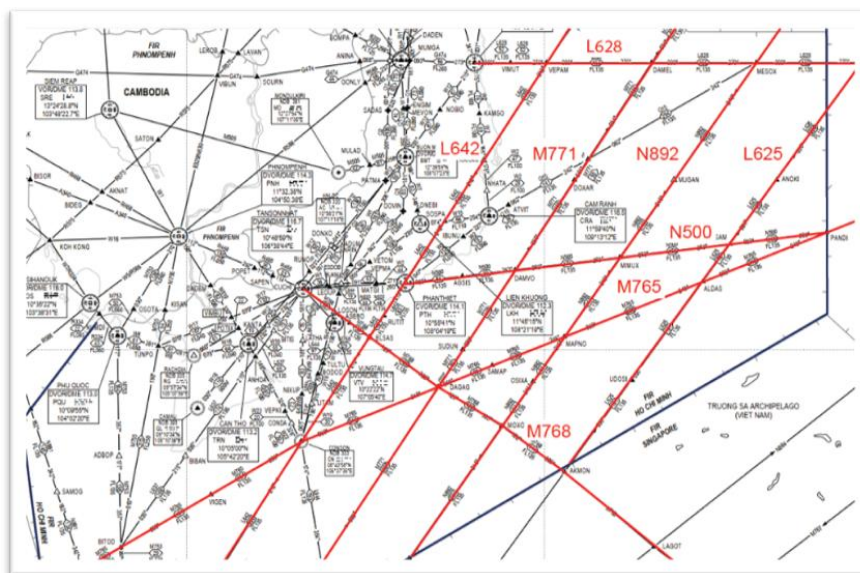


Рисунок 1.20. Маршруты ОВД с использованием ADS-B в ВП РДЦ Хошимина

В настоящее время в ВП Хошимина действует пять систем наблюдения ADS-B, размещенных в точках: Дананг, Камрань, Чьонг Са Лон, Сонг Ту Тай и Кон Сон. Однако, согласно отчету компании ATTECH, качество сигнала ADS-B в ВП РДЦ Хошимина остаётся неудовлетворительным в ряде зон, что негативно влияет на процесс наблюдения за ВД. В частности, слабый и нестабильный сигнал наблюдается в начале секторов 2 и 6, в конце сектора 3, а также на севере и западе зоны ТМА ТСН, создаёт потенциальные риски и затрудняет устойчивый контроль за ВС (рисунок 1.21).

Эта ситуация подчеркивает необходимость дальнейшего расширения использования технологии ADS-B на другие участки ВП и маршруты УВД во Вьетнаме. Внедрение дополнительного оборудования и увеличение зоны покрытия ADS-B позволит значительно повысить качество наблюдения ВД, минимизировать пробелы в контроле, а также улучшить координацию и БП.

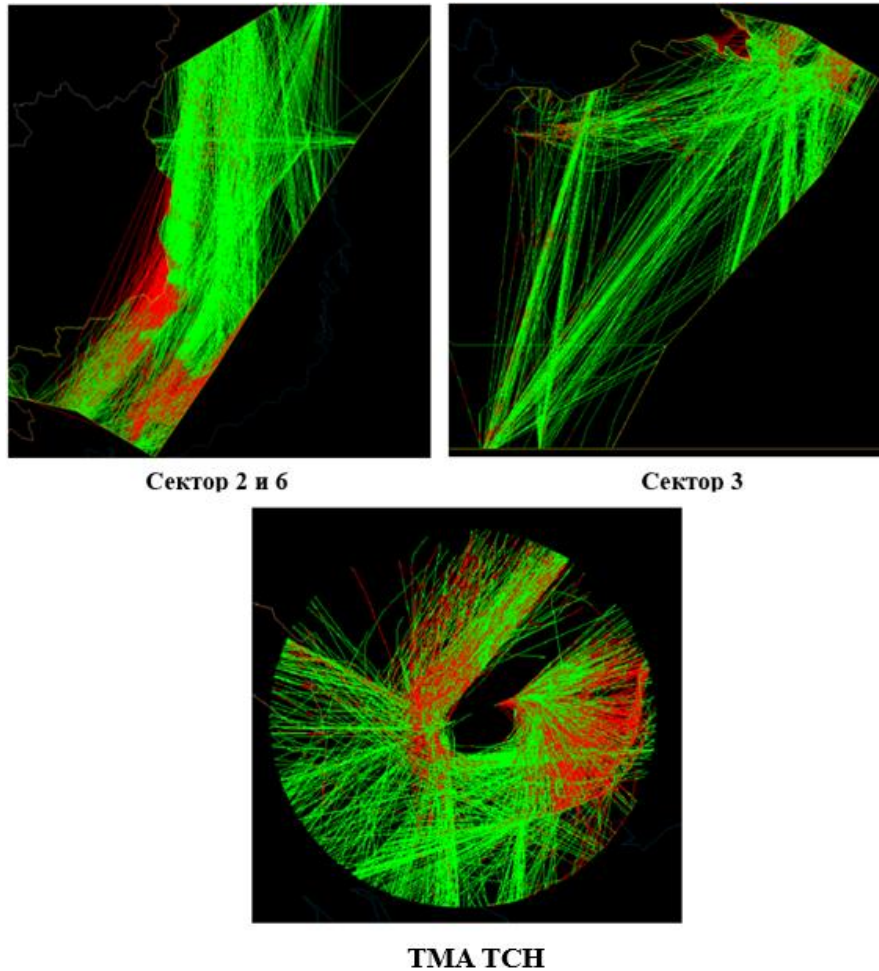


Рисунок 1.21. Результаты оценки сигнала ADS-B (по данным компании АТТЕСН)

Многопозиционная система наблюдения (MLAT) и Широкозонные мультilaterационные системы навигации (WAM)

В настоящее время аэропорт Фукуок является единственным аэропортом в ВП Хошимина, где установлена система MLAT [49]. Введение этой системы способствовало повышению качества наблюдения и поддержки принятия решений авиадиспетчерами, что, в свою очередь, значительно увеличило ПС аэропорта Фукуок и повысило эффективность взлетов и посадок. Поэтому необходимо расширить установку системы MLAT в крупнейших аэропортах в ВП Хошимина, таких как ТСН, Камрань и Дананг. Это позволит улучшить процесс наблюдения и контроля ВД, повысить ПС аэропортов, снизить загруженность ВП и повысить эффективность УВД в ВП Хошимина.

В ВП Хошимина WAM можно использовать от ЭП290 до ЭП460. Она может стать резервным источником наблюдения, дополнив, а в дальнейшем заменив ВОРЛ. Использование WAM поможет авиадиспетчерам расширить свои возможности по контролю за операциями в неблагоприятных погодных условиях или в случаях высокой интенсивности ВД. Это снизит нагрузку на авиадиспетчеров, повысит БП, а также снизит влияние погоды на взаимодействие авиадиспетчеров с ВС. Использование WAN поможет авиадиспетчерам легко обнаруживать неопознанные ВС, залетающие в зону их ответственности, контролировать все ВС в зоне ответственности и предотвращать потерю меток от ВС.

Сокращение минимальных интервалов горизонтального эшелонирования ВС на маршруте ОВД

В настоящее время минимумы горизонтального эшелонирования между ВС на маршрутах ОВД при радиолокационном управлении составляет 10 морских миль для ВП РДЦ Хошимина. Эта величина приводит к определенному снижению ПС при ИВП. Поэтому для увеличения ПС ВП необходимо сократить минимумы горизонтального эшелонирования между ВС на маршрутах ОВД до 5 морских миль.

Согласно правилам Управления ГА Вьетнама, для обеспечения минимумов горизонтального эшелонирования в 5 морских миль (для зонального диспетчерского обслуживания) и 3 морских миль (для диспетчерского обслуживания подхода) должно быть как минимум две системы наблюдения и сигналы двух систем должны быть интегрированы в один экран наблюдения ОрВД. Поэтому развертывание современной системы наблюдения (WAM или ADS-B) в дополнение к вторичному обзорному радиолокатору крайне необходимо для повышения ПС ВП.

Другие методы

- применение ССО/CDO при установлении схемы вылета, прибытия и захода на посадку в аэропортах ВП Хошимина. В настоящее время аэропорты в ВП Хошимина применяют RNP1/RNAV1 и RNP APP для схем вылета, прибытия и захода

на посадку. Однако при разработке этих методов не уделялось внимания систематическому построению ССО/CDO;

- расширение взаимодействия при внедрении ОПВД с другими странами (Китай, Филиппины и др.);
- продолжение расширения и развития маршрутов PBN;
- укрепление сотрудничества с ведомствами государственной авиации по ИВП Вьетнама;
- укрепление сотрудничества с ведущими странами мира в области подготовки специалистов по ОрВД;
- сотрудничество с Китаем и Филиппинами в использовании автоматической идентификации и сбора данных (AIDC) для снижения нагрузки на персонал УВД;
- разработка методов эксплуатации ВС, обеспечивающих максимально эффективное использование ПС ВПП.

Оптимизация сети маршрутов ОВД

Вышеуказанные меры не полностью решили проблему перегруженности ВП РДЦ Хошимина, обусловленную высокой интенсивностью ВД и недостаточной рациональностью организации маршрутов ОВД. Для решения задачи требуется разработать специализированное программное обеспечение, способное оптимизировать сеть маршрутов ОВД с учётом строго заданных рамок проектирования маршрутов, формируемых в соответствии с актуальными нормативными положениями. Это требует создания математической модели и применения алгоритмов оптимизации, что позволит сформировать эффективную сеть маршрутов ОВД с учётом заданной целевой функции и ограничений.

Кроме того, необходимо создать систему поиска альтернативных маршрутов, которая позволит оперативно перестраивать траектории полётов при возникновении непредвиденных обстоятельств, таких как перегруженность отдельных участков ВП, неблагоприятных метеоусловий или технических неисправностей ВС.

Выводы по главе 1

1. На основе теоретических исследований можно заключить, что проектирование и оптимизация маршрутов ОВД являются ключевыми этапами в формировании эффективной структуры ВП. Определены важнейшие показатели и принципы, которые необходимо учитывать при разработке маршрутов ОВД.

2. Анализ статистических данных о количестве полётов и времени использования частот VHF для обеспечения УВД в ВП Хошима были выявлены серьезные проблемы, связанные с перегруженностью ВП. Текущая конфигурация ВП, а также организация маршрутов ОВД в данном регионе имеют ряд недостатков, требующих реорганизации.

3. Применение мер по повышению ПС ВП Хошима является необходимым. Были проанализированы и оценены такие меры, как реорганизация секторов, внедрение систем AMAN/DMAN в аэропорту ТСН, использование современных систем наблюдения и снижение минимальных стандартов горизонтального эшелонирования.

4. Разработка программы оптимизации маршрутов ОВД представляет собой чрезвычайно важную задачу на данный момент, особенно с учётом текущего ИВП РДЦ Хошима. В главе 2 будет рассмотрено построение математической модели и разработка модели, способной оптимизировать сеть маршрутов ОВД. Получаемые с помощью модели результаты будут проанализированы для выбора наиболее подходящей сети маршрутов и выполнено планирование её использования. Далее будет разработана модель поиска динамических альтернативных оптимальных маршрутов для основных маршрутов сети, представленная в главе 3.

Глава 2. Разработка модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения для воздушного пространства с высокой интенсивностью полётов и планирование их использования

2.1. Математическая модель задачи оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения с заданными ограничениями

Цели модели и сценарии оптимизации

Концепция эффективного планирования маршрутов в системе ОрВД является неотъемлемой частью повышения эксплуатационной эффективности, сокращения затрат авиаперевозчиков и оптимизации ИВП. Современные методы планирования базируются на математических моделях и методах оптимизации, позволяющих формализовать задачу и учесть сложные взаимосвязи параметров системы.

Поставленная задача при разработке модели оптимизации сети маршрутов ОВД заключается в нахождении оптимального маршрута между аэропортами/навигационными средствами/точками пути (далее совместно именуемыми поворотными пунктами маршрута (ППМ)) с минимальной протяжённостью перемещения при соблюдении заданных ограничений. Иными словами, необходимо выбрать оптимальный маршрут из множества всех возможных маршрутов в графе, представляющем оптимальные маршруты, который удовлетворяет всем требованиям.

Первый и наиболее важный этап заключается в определении цели модели. Этот этап является основой для дальнейших исследований, поскольку правильное определение целей позволяет не только направить усилия в нужное русло, но и минимизировать возможные ошибки при выборе методов и инструментов моделирования. Важно понимать, что каждый дополнительный параметр или

ограничение может существенно изменить характер задачи, и потому их тщательное рассмотрение на начальном этапе гарантирует более точные и эффективные результаты. В данной модели исследования целью является нахождение оптимальной конфигурации сети маршрутов ОВД с минимальной протяжённостью каждого маршрута в трёх конкретных сценариях.

- **сценарий 1:** не накладывается никаких ограничений на точки пересечения маршрутов в ППМ, образующих маршруты. Все ППМ могут соединять маршруты под произвольным углом без каких-либо дополнительных условий;

- **сценарий 2:** оптимизированный маршрут ОВД не должен пересекать запретные зоны, зоны ограничения полётов и опасные зоны (далее именуемые бесполётными зонами);

- **сценарий 3:** угловые значения в ППМ пересечения маршрутов ОВД не должны быть меньше минимального значения. Этот сценарий включает два случая:

- случай 1: установка ограничения на угол пересечения маршрутов в ППМ сети, если ППМ является промежуточным на маршруте ОВД (т.е. данное ограничение не распространяется на начальные и конечные ППМ маршрутов ОВД);

- случай 2: ограничение на углы пересечения маршрутов вводится для всех ППМ за исключением ППМ «TSH». ППМ «TSH» исключается из условий ограничения, так как он выполняет ключевую роль в сети, будучи связующим элементом для множества маршрутов. В частности, ППМ «TSH» является начальным или конечным ППМ для многих важных маршрутов ОВД, выбранных для оптимизации. Введение ограничения на углы пересечения в этом ППМ может привести к невозможности построения полного набора оптимальных маршрутов, удовлетворяющих всем условиям.

Математическая модель

Сеть маршрутов в ОВД в структуре ВП может быть описана двухмерной матрицей, состоящей из двух основных компонентов:

- маршрут ОВД – m , где $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, M – множество всех маршрутов ОВД в сети;

- участки маршрута – u , где $u \in \{1, 2, \dots, U\}$, U – множество всех участков каждого маршрута ОВД (m).

Каждый маршрут ОВД (m) может состоять из множества участков маршрута, которые определяются координатами ППМ (x, y), углами между участками маршрута (γ) и их протяжённостями (d). Конкретно:

$$m(u) = [(x, y), (\gamma, d)]. \quad (2.1)$$

Эти компоненты изначально представлены в виде матрицы, где каждая строка матрицы описывает маршрут, а каждая ячейка строки содержит данные об участке маршрута. Однако матрица как способ описания имеет ограниченную гибкость при решении задач маршрутизации, оптимизации или анализа. Поэтому переход к модели в виде графа $G = (N, F)$, где множество узлов $N = \{N_0, N_1, N_2, \dots, N_z\}$ и множество дуг $F = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$, становится естественным шагом, позволяющим упростить работу с данной структурой. Граф G описывает эти связи более наглядно: узлы N представляют ППМ маршрута, а дуги F – прямые связи между этими ППМ, включая такие характеристики, как угол (γ) и протяжённость (d). Дуга в множестве F – это прямая, соединяющая любые два ППМ N_i в множестве N . Дуга может быть описана так: $F(N_i, N_j)$ – дуга между двумя ППМ N_i и N_j . Для количественного описания графа вводится матрица расстояний $D[N_i, N_j]$, элементы которой характеризуют длину пути или отсутствие связи между ППМ. Она задаётся следующей формулой:

$$D[N_i, N_j] = \begin{cases} 0, & \text{для } N_i \equiv N_j; \\ d_{i,j}, & \text{конечная величина, если есть дуга из ППМ } N_i \text{ в ППМ } N_j; \\ \infty, & \text{если нет дуги из ППМ } N_i \text{ в ППМ } N_j. \end{cases} \quad (2.2)$$

В графе G каждый маршрут ОВД формирует подграф $G^m = (N^m, F^m)$, который содержит узлы и дуги, принадлежащие этому маршруту, где $N^m \subset N$ и $F^m \subset F$. Маршрут ОВД представляет собой последовательность прямых линий,

соединяющих начальный и конечный ППМ, а также ППМ пути, расположенные между ними. начальный ППМ (N_0^m) и конечный ППМ (N_{last}^m) могут быть как аэропортами, так и точками передачи управления. На каждом маршруте ОВД ППМ $N \in N^m$ перемещается от N_0^m до N_{last}^m . То есть, когда $N \equiv N_0^m$ соответствует начальный ППМ маршрута ОВД, а $N \equiv N_{last}^m$ соответствует конечный ППМ маршрута ОВД. Далее используются следующие значения:

- (x_N, y_N) : представляет широту и долготу ППМ N ;
- $d_{N,N+1}^m$: длина участка, соединяющего ППМ N и ППМ $N+1$ маршрута ОВД.

Значение $d_{N,N+1}^m$ можно рассчитать следующим образом:

$$d_{N,N+1}^m = \sqrt{(x_{N+1} - x_N)^2 + (y_{N+1} - y_N)^2} . \quad (2.3)$$

Примечание: Длина маршрута ОВД в структуре ВП – это сумма длин дуг $F(N, N+1)$, составляющих данный маршрут, т.е. сумму $d_{N,N+1}^m$ при $N \in [N_0^m, N_{last}^m]$.

Для построения уравнений в математической модели будут использоваться следующие параметры:

- B^m : зона действия навигационных станций в структуре ВП – G;
- $\theta_{q,p}^m$: угол, образованный $F(q,p)$, соединяющим ППМ q и ППМ p (где $q, p \in N$), расположен между маршрутом ОВД и осью магнитного севера;
- Z^m : минимальный боковой интервал между двумя параллельными маршрутами ОВД;
- переменная решения $O_{N,j}^m$ обозначает дугу от ППМ N до ППМ j на маршруте ОВД. Переменная $O_{N,j}^m$ описывается так:

$$O_{N,j}^m = \begin{cases} 1, & \text{если выбирает } F(N, j), \text{ при определении маршрута ОВД;} \\ 0, & \text{другие случаи.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Целевая функция

Построение целевой функции играет ключевую роль в корректной постановке задачи оптимизации. Целевая функция (2.5) используется во всех трёх сценариях. В сценариях 2 и 3, помимо выполнения целевой функции, модель должна учитывать

проектирование оптимизированных маршрутов ОВД, удовлетворяющих установленным ограничениям, связанным с условиями разработки маршрута. Уравнение (2.6) применяется в сценарии 2, чтобы обеспечить обход бесполётных зон оптимизированным маршрутом, тогда как в сценарии 3 используется уравнение (2.7), которое гарантирует, что углы на пересечениях маршрута превышают заданное минимальное значение. При этом условия применения уравнения (2.7) в сценарии 3 зависят от конкретного случая. В частности, в случае 1 уравнение (2.7) действует для всех ППМ, за исключением N_0^m и N_{last}^m . В случае 2 уравнение (2.7) не применяется, если $(N_0^m = TSH) \vee (N_{last}^m = TSH)$.

$$D_m = \sum_{N=N_0^m}^{N_{last}^m-1} d_{N,N+1}^m \rightarrow \min . \quad (2.5)$$

$$\sum_{F(N,j) \in F_S} S_k \times O_{N,j}^m = 0; \quad \forall F(N,j) \cap S_k = \emptyset . \quad (2.6)$$

где: S_k : площадь бесполётной зоны в структуре ВП – G.

F_S : множество всех дуг, которые могут проходить через бесполётные зоны.

$$\Delta \theta_q^{m,n} = \left| \theta_{q,p}^m - \theta_{q,p'}^n \right| \geq \theta_{\min} . \quad (2.7)$$

где: $\Delta \theta_q^{m,n}$ – это угол между маршрутами ОВД в ППМ q , p и p' — это ППМ, следующие за q на маршрутах « m » и « n » соответственно.

Значение θ_{\min} зависит от используемых средств навигации при пролёте q :

* если ППМ q является географическим пунктом (имя ППМ обозначается пятью символами) либо станцией NDB (имя ППМ обозначается двумя символами), то $\theta_{\min} = 30^\circ$;

* если ППМ q является станцией VOR (имя ППМ обозначается тремя символами): $\theta_{\min} = 15^\circ$.

Особенности структуры ВП графа G

- дуга, состоящая из двух ППМ N_i и N_{i+1} , может иметь «встречную» дугу, т.е. может существовать $F(N_i, N_{i+1})$ или $F(N_{i+1}, N_i)$. Если существуют две дуги $F(N_i, N_{i+1})$ и

$F(N_{i+1}, N_i)$, маршрут ОВД является двусторонним маршрутом, в противном случае, если существует только одна из двух дуг $F(N_i, N_{i+1})$ или $F(N_{i+1}, N_i)$, то это односторонний маршрут от N_i до N_{i+1} или наоборот;

- максимальное число дуг графа $G = (N, F)$ с N узлами (без учёта направления движения ВС) определяется по уравнению (2.8). Это также максимальное количество дуг, которое можно использовать для проектирования сети маршрутов ОВД. Как упоминалось выше, дуга может использовать два направления или одно направление:

$$\max F = \frac{N \times (N - 1)}{2}. \quad (2.8)$$

- вокруг ППМ N_i будет множество ППМ, находящихся на заданном расстоянии l от ППМ N_i . Это множество используется для поиска дуг, выходящих из ППМ N_i (одна из этих дуг будет выбрана как дуга кратчайшего (оптимального) маршрута ОВД). Это множество может быть описано с помощью уравнения (2.9):

$$L(N_i, l) \stackrel{def}{=} \{N_u \in N \mid d_{N_i, N_u} = l\}. \quad (2.9)$$

- когда ППМ N_i определяется как навигационная станция (NDB, VOR, DME), дуги, содержащие ППМ N_i , должны находиться в зоне действия навигационных станций, чтобы обеспечить безопасность и навигационные сигналы для ВС, соответствующее требование формализуется уравнением (2.10):

$$\forall F(N_i, N_{i+1}) \subseteq B^m. \quad (2.10)$$

Примечание: Значение зоны действия навигационных станций зависит от многих факторов, таких как мощность навигационной станции, высота (эшелон) полёта ВС, рельеф местности и т.д. Как правило, среднее значение зоны действия VOR составляет 130 миль, NDB – 75 миль, а DME – 200 миль.

- когда ППМ N_i является точкой пути, используется метод навигации РВН. В этом случае маршруты ОВД вдоль маршрута от начального ППМ до конечного ППМ могут быть указаны внутри прямоугольника. Его длина должна равняться протяжённости маршрута, а ширина – в два раза превышать максимально

допустимое значение отклонения x соответствующего метода навигации RNAV $_x$ /RNP $_x$ (например, RNP10, ширина составляет 20 морских миль), формулировка условия дана в уравнении (2.11):

$$F^m \subseteq S_{rec}, S_{rec} = |N_0^m N_{last}^m| \times 2x. \quad (2.11)$$

Математическое уравнение, определяющее каждый маршрут ОВД

- действительные маршруты ОВД должны идти от начального ППМ до конечного ППМ. Маршрут ОВД не имеет дуг, входящих в начальный ППМ, и дуг, выходящих из конечного ППМ, данное условие задаётся уравнениями (2.12)–(2.14):

$$d_{N_v, N_0^m}^m = d_{N_{last}^m, N_t}^m = 0, \quad (2.12)$$

где: $N_t \in N^{m+} (N_{last}^m), N_v \in N^{m-} (N_0^m)$

$$\sum_{j \in N^{m+} (N_0^m)} O_{N_0^m, j}^m - \sum_{j \in N^{m+} (N_0^m)} O_{j, N_0^m}^m = 1, \forall m \in M. \quad (2.13)$$

$$\sum_{j \in N^{m-} (N_{last}^m)} O_{j, N_{last}^m}^m - \sum_{j \in N^{m-} (N_{last}^m)} O_{N_{last}^m, j}^m = 1, \forall m \in M. \quad (2.14)$$

- для любого ППМ N (кроме начального и конечного ППМ) количество входящих в него дуг равно количеству выходящих из него дуг, что формализуется уравнением (2.15):

$$\sum_{N \in N^{m+} (j)} O_{N, j}^m = \sum_{N \in N^{m+} (j)} O_{j, N}^m, m \in M, \forall j \in N^m - \{N_0^m, N_{last}^m\}. \quad (2.15)$$

- суммарное количество дуг, входящих и выходящих на каждом ППМ N , не должно превышать заданное пороговое значение (F_{max}), равенство фиксируется уравнением (2.16):

$$\sum_{j \in N^m} F(N, j) + \sum_{i \in N^m} F(i, N) \geq F_{max}. \quad (2.16)$$

- чтобы гарантировать, что каждый маршрут ОВД не образует замкнутого цикла (т.е. маршрут не проходит через один и тот же ППМ более одного раза), необходимо, чтобы следующее уравнение удовлетворяло каждому возможному циклу φ , что выражается уравнением (2.17):

$$\sum_{N,j \in \varphi} O_{N,j}^m \leq |\varphi| - 1, m \in M, \forall \varphi, \quad (2.17)$$

где: $|\varphi|$: сумма всех дуг в замкнутом цикле φ ;

- если два маршрута ОВД проектируются параллельно, необходимо соблюдать следующее ограничение, определяется уравнением (2.18):

$$z^{m,n} \geq Z^m, \quad (2.18)$$

где: $z^{m,n}$ – интервал между двумя параллельными маршрутами ОВД – « m » и « n ».

Допущения модели

Для того чтобы модель соответствовала функциональным требованиям на этапе стратегического проектирования и одновременно снижалась сложность задачи при сохранении применимости в большинстве реальных условий, наряду с целевой функцией и ограничениями вводится ряд допущений. Введение допущений позволило не только адаптировать математическую модель к реальным условиям эксплуатации, но и учесть специфические особенности системы, включая техническую инфраструктуру, организационные аспекты ОВД и устойчивость трафика. В модели приняты следующие допущения:

- навигационная инфраструктура: все системы и устройства, поддерживающие навигацию (например, VOR, DME, GNSS), предполагаются работающими в штатном режиме и обеспечивающими стабильное покрытие;

- характеристики ВП и организация органа ОВД: структура и границы ВП, а также возможности органа ОВД считаются фиксированными и неизменными на протяжении всего периода эксплуатации;

- интенсивность и плотность ВД считаются постоянными, без влияния чрезвычайных ситуаций или резкого роста спроса.

2.2. Обработка входных данных

В данной модели использованы координатные данные (широта и долгота) 130 ППМ, взятые из Сборника аэронавигационной информации Вьетнама. Среди них 114 ППМ находятся в пределах зоны ответственности РДЦ Хошимина, а оставшиеся 16 ППМ расположены в приграничных районах ВП, примыкающих к зоне РДЦ Хошимина, и способны оказывать влияние на ВД внутри её зоны. Поскольку ВП РДЦ Хошимина охватывает как земную, так и морскую территории, 130 ППМ распределены на три основные зоны: земля (Land), побережье (Coast) и море (Sea). В частности:

- побережье (Coast): ППМ, расположенные на расстоянии до 30 км по обе стороны от береговой линии в ВП РДЦ Хошимина;
- земля (Land): ППМ, находящиеся на суше в ВП РДЦ Хошимина, за исключением ППМ, относящихся к категории побережья;
- море (Sea): ППМ, расположенные на морской территории в ВП РДЦ Хошимина, за исключением ППМ, относящихся к категории побережья.

После определения координат всех ППМ устанавливается связь «родительский ППМ – дочерний ППМ». Для формирования такой связи вокруг каждого родительского ППМ строится круг фиксированного радиуса, внутри которого идентифицируются дочерние ППМ. На каждой итерации сканирования с угловым шагом в один градус из области сканирования выбирается лишь один дочерний ППМ – тот, который находится на минимальном расстоянии от родительского. Принцип выбора дочерних ППМ иллюстрируется на рисунке 2.1, при этом выбранные ППМ выделены зелёным цветом.

Для родительских ППМ, расположенных в различных зонах (побережье, земля, море), значения радиуса круга, используемого для определения дочерних ППМ, различаются. Эти значения рассчитываются с учётом действующих минимумов эшелонирования, плотности расположения ППМ и фактического расстояния между парами ППМ. Если родительский ППМ находится в зоне «земля», его дочерний ППМ может располагаться либо в зоне «земля», либо в зоне «побережье», при этом

радиус круга составляет 175 км. Для родительского ППМ в зоне «море» дочерний ППМ может находиться либо в зоне «море», либо в зоне «побережье», а радиус круга при этом равен 330 км. Наконец, если родительский ППМ расположен в зоне «побережье», радиус круга составляет 175 км для дочернего ППМ в зоне «земля» или «побережье» и 330 км, если дочерний ППМ находится в зоне «море».

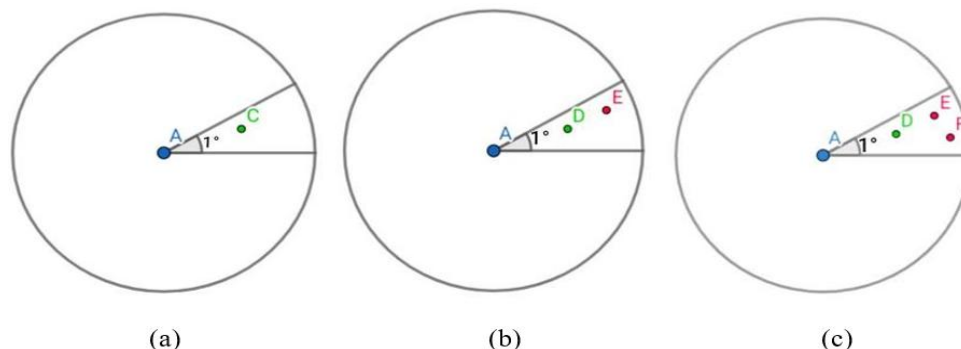


Рисунок 2.1. Иллюстрация связей между ППМ (ППМ А – родитель)

Необходимо учитывать, что для правильного применения данных правил требуется использование точных координат. В связи с этим в модели применяются географические координаты (широта и долгота) в десятичных градусах. Для оценки влияния сферической кривизны Земли используется формула расстояния по большому кругу (уравнение 2.19) [50]:

$$d \text{ (км)} = 111.12 \cos^{-1} [\sin x_1 \times \sin x_2 + \cos x_1 \times \cos x_2 \times \cos(y_2 - y_1)], \quad (2.19)$$

где: d (км) – расстояние по большому кругу между 2 координатами в км;

x_1 и x_2 – широты ППМ N и $N + I$ соответственно;

y_1 и y_2 – долготы ППМ N и $N + I$ соответственно.

Рисунки 2.2 и 2.3 соответственно иллюстрируют все связи между ППМ в регионах «земля–побережье» и «побережье–море» для 130 ППМ после применения вышеуказанного метода. На этих рисунках ППМ, расположенные на земле, обозначены зелёным цветом, ППМ, находящиеся вдоль побережья, выделены розовым цветом, а ППМ, расположенные в море, обозначены синим цветом.

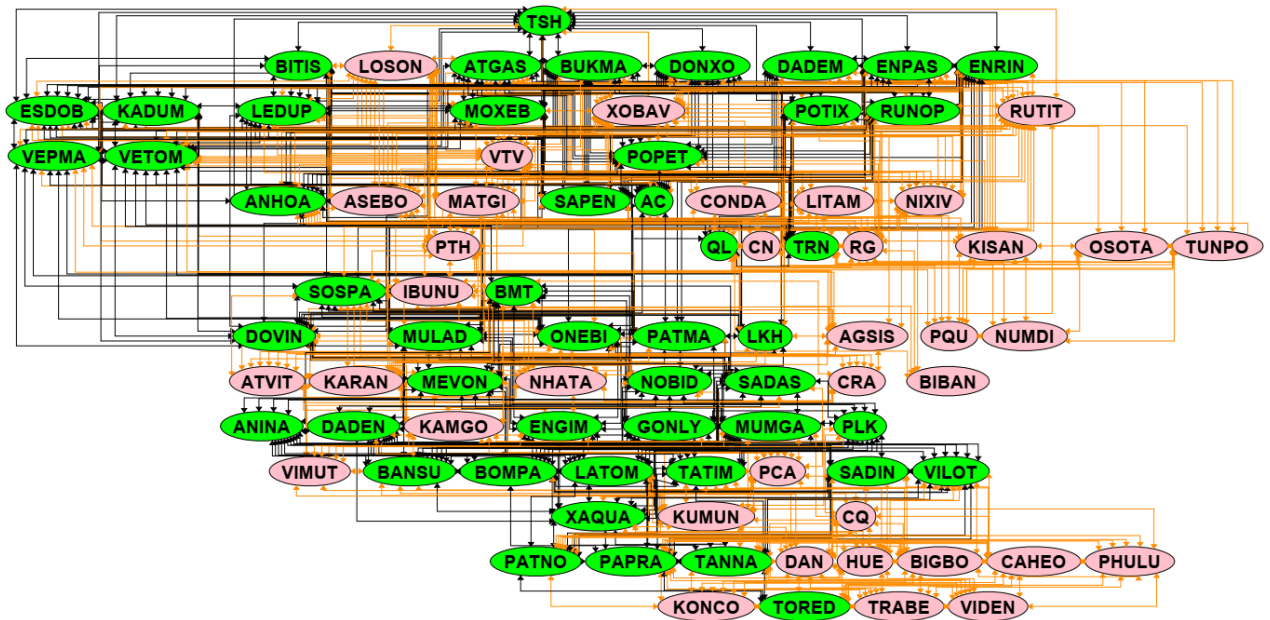


Рисунок 2.2. Соединения между всеми ППМ в регионе «земля–побережье»

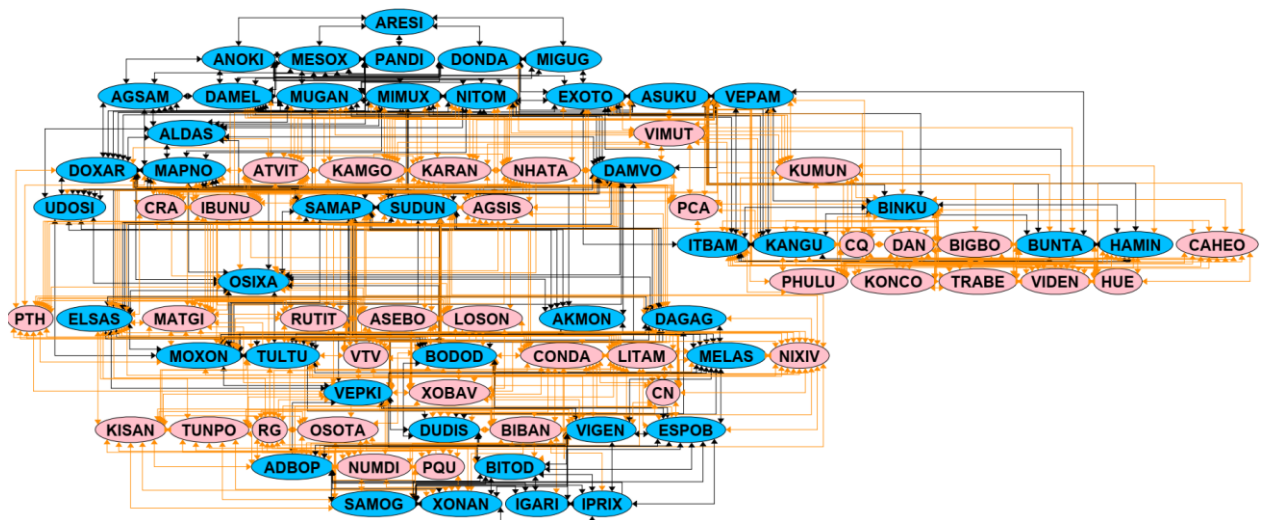


Рисунок 2.3. Соединения между всеми ППМ в регионе «побережье–море»

После завершения построения взаимосвязей между ППМ, т.е. формирования полного ориентированного графа, следующим этапом становится разработка перечня оптимальных маршрутов ОВД. Для реализации этой задачи был проведён детальный анализ статистики состояния ВД в ВП РДЦ Хошима за период июнь–август 2024 года, включающий сведения о количестве рейсов по каждому маршруту, распределении ВД по временным промежуткам и динамике изменения

загруженности ВП. На основании собранных данных и с опорой на экспертные оценки была выполнена оценка значимости фактических связей между ППМ в контексте авиационных операций. При этом учитывались такие параметры, как плотность ВД, степень интеграции маршрутов с ключевыми регионами и эффективность их эксплуатации в оперативной деятельности.

По результатам проведённого анализа было отобрано 20 маршрутов ОВД, охватывающих как внутренние, так и международные маршруты в ВП РДЦ Хошимина, для их оптимизации. Оптимальные маршруты должны иметь четко определенные начальные и конечные ППМ, которые могут быть аэропортами (ППМ из трёх символов) или точками передачи управления (ППМ из пяти символов). Для внутренних маршрутов ОВД были выбраны следующие направления: TSH – DAN, CRA – PQU, DAN – PQU, CRA – DAN, PCA – TRN. Что касается международных маршрутов ОВД, были выбраны маршруты: TSH – ARESI, TSH – IGARI, TSH – BUNTA, CRA – BUNTA, TSH – DUDIS, TSH – POPET, EXOTO – ESPOB, DUDIS – DONDA, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI, TSH – PANDI, TSH – AKMON, PANDI – IGARI, PQU – IGARI, ANINA – ARESI.

2.3. Алгоритм оптимизации

Современные методики оптимизации маршрутов опираются на интеграцию широкого круга научных дисциплин, включая теорию оптимального управления, статистику, теорию игр, теорию графов. Существующие исследования демонстрируют, что методики, опирающиеся на методы теории оптимального управления [51–56] и теории графов [57–61], показывают высокую эффективность при планировании траектории или маршрута в пространственно-временной области. Анализ этих работ указывает на то, что для задач с непрерывной природой

наибольшую результативность обеспечивают методы теории оптимального управления, тогда как для дискретных задач оптимизации наилучшие показатели достигаются с помощью алгоритмов теории графов.

В рамках задач оптимизации сети маршрутов ОВД, а также динамической оптимизации поиска альтернативных маршрутов, каждый маршрут рассматривается как самостоятельный объект. Допустимое решение для конкретного маршрута ОВД формируется в виде набора дуг, отобранных из исходного множества и образующих корректную траекторию. В связи с этим применение методов теории графов является наиболее целесообразным, поскольку они позволяют эффективно анализировать структуру сети и решать задачи выбора и перестроения маршрутов.

Для реализации цели оптимизационной модели в данном исследовании были проанализированы несколько алгоритмов, основанных на методах теории графов: алгоритм Дейкстры [62], алгоритм Беллмана–Форда [62], алгоритм GNN [63] и алгоритм A-star [64]. Каждый из рассмотренных алгоритмов обладает своими ограничениями, что подчёркивает критическую важность корректного выбора наиболее подходящего метода. Алгоритм Дейкстры, несмотря на простоту реализации и способность точно определять кратчайшие маршруты, оказывается крайне ресурсоёмким при анализе больших и сложных сетей маршрутов, что ограничивает его практическую применимость в условиях высокозагруженного ВП [65]. Аналогично, алгоритм Беллмана–Форда, хотя и способен работать с графами, содержащими отрицательные веса рёбер, характеризуется низкой скоростью сходимости и высоким объёмом потребляемой памяти [66]. Следует отметить, что возможность обработки отрицательных весов не имеет значимой практической ценности для авиации, где все рёбра (например, расстояние или время) имеют неотрицательные значения. Алгоритм GNN, основанный на графовых нейронных сетях, демонстрирует перспективность для поиска кратчайшего маршрута, поскольку эффективно обрабатывает сложные структуры графов и выявляет скрытые взаимосвязи между вершинами. Тем не менее отсутствие гарантии нахождения

оптимального решения, высокая зависимость от объёма обучающих данных, сложности масштабирования, ограниченная интерпретируемость и чувствительность к изменениям структуры графа затрудняют его практическое внедрение [67]. В отличие от вышеописанных методов, алгоритм A-star сочетает ключевые преимущества, позволяя учитывать многочисленные факторы и ограничения при поиске оптимальных решений в сложных и динамически изменяющихся условиях. Одним из его главных достоинств является эвристический подход, существенно ускоряющий процесс поиска за счёт концентрации усилий на наиболее перспективных областях пространства решений. Это обеспечивает высокую эффективность алгоритма при работе с крупными сетями и в условиях ограниченного времени. Кроме того, A-star отличается высокой точностью и предсказуемостью, поскольку на каждом шаге стремится минимизировать суммарную стоимость маршрута, что способствует нахождению действительно оптимального пути. Возможность учёта динамических изменений в сети, таких как внезапное увеличение нагрузки или изменение условий эксплуатации, поддерживает эффективность алгоритма в реальном времени. За последние годы появилось множество значимых исследований [68–74], посвящённых применению алгоритма A-star и его модификаций для поиска оптимальных маршрутов транспортных средств и роботов с учётом заданных ограничений. Однако большинство из этих работ сосредоточено на оптимизации отдельных маршрутов и не рассматривает взаимосвязи между маршрутами при необходимости одновременной оптимизации нескольких путей, как это требуется в задачах оптимизации сети маршрутов ОВД. Этот аспект открывает перспективное направление для дальнейших исследований и развития методов, основанных на алгоритме A-star.

На основе всестороннего анализа эффективных методов к оптимизации сети маршрутов ОВД с применением гибкой маршрутизации, а также в рамках разработанной математической модели, в программной реализации в качестве базового был выбран алгоритм A-Star.

Алгоритм A-star находит оптимальный маршрут

Алгоритм A-star – один из наиболее эффективных и широко используемых методов информированного поиска в теории графов, предназначенный для нахождения маршрута с минимальной «стоимостью» между двумя узлами, впервые представлен как алгоритм A Hart et al [75]. Его основная идея заключается в сочетании эвристического подхода с точным расчетом «стоимости» маршрута, что значительно ускоряет процесс поиска по сравнению с неоптимизированными методами. Алгоритм начинается с рассмотрения всех смежных узлов с начальным, выбирая узел с минимальным значением функции стоимости $f(N)$, которая вычисляется как сумма двух компонентов: $g(N)$ – «стоимости» маршрута от начального узла до текущего и $h(N)$ – эвристической оценки оставшегося расстояния до конечной точки. Таким образом, функция стоимости маршрута определяется как, согласно уравнению (2.20):

$$f(N) = g(N) + h(N). \quad (2.20)$$

Алгоритм A-star относится к классу методов оптимизационного поиска маршрутов и базируется на положениях теории графов; в этой связи в качестве наиболее значимых входных параметров используются координаты ППМ, а также весовые характеристики, характеризующие расстояния между ними.

На рисунке 2.4А изображён процесс поиска оптимального маршрута, который начинается в начальном ППМ (красный квадрат), проходит через промежуточные ППМ (белые квадраты) и завершается в конечном ППМ (зелёный квадрат). Алгоритм основывается на анализе родительско-дочерних связей между ППМ и заранее заданных значений расстояний. В сети ППМ существуют заблокированные ППМ (чёрные квадраты), которые не могут использоваться при построении маршрута. Причины блокировки могут включать расположение в запретной зоне, зоне ограничения полётов или опасной зоне, а также невозможность эксплуатации в реальных условиях из-за неблагоприятных погодных условий, технических неисправностей или других факторов. Рисунок 2.4Б иллюстрирует оптимальный

маршрут от начального ППМ N1 к конечному N9, выбранный после оценки всех альтернативных траекторий, проходящих через промежуточные ППМ с координатами, заданными широтой и долготой.

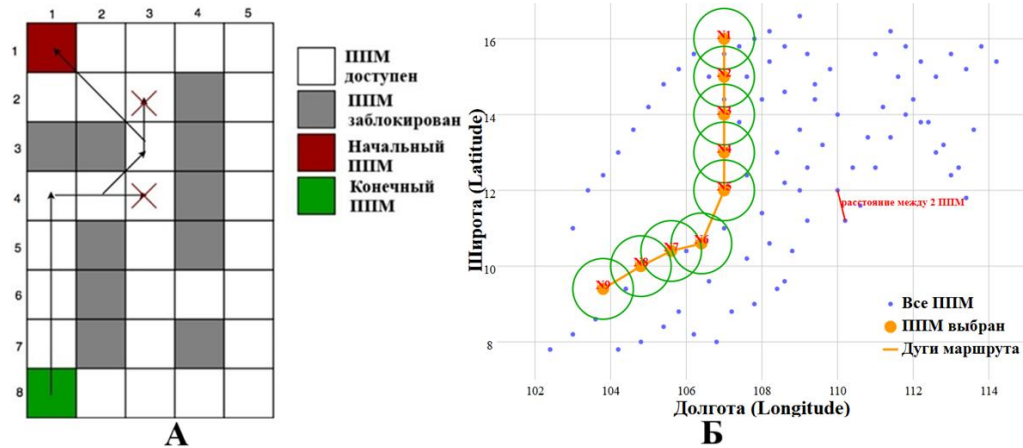


Рисунок 2.4. Иллюстрация входных данных и их взаимосвязи в алгоритме A-star

В алгоритме A-star решающую роль играет введение эвристической функции $h(N)$, которая обеспечивает рациональное и целенаправленное построение маршрута к целевому ППМ, повышая точность поиска и снижая вычислительные затраты по времени. Данная эвристика выступает в качестве оценочного механизма, позволяющего аппроксимировать ожидаемую стоимость достижения цели из каждого анализируемого ППМ. При этом алгоритм A-star не накладывает ограничений на конкретную форму эвристической функции: она может быть сформулирована и модифицирована в соответствии с поставленными пользователем задачами. Ключевым свойством эвристики является её допустимость, которая имеет место в том случае, если для всех ППМ оценка стоимости пути к целевому ППМ не превышает его реальную минимальную стоимость.

Модель применения A-star в оптимизации сети маршрутов ОВД

Оптимизация сети маршрутов ОВД с использованием алгоритма A-star начинается с построения взаимосвязей между ППМ и определения начальных и конечных ППМ для каждого маршрута. На рисунке 2.5 представлена блок-схема,

иллюстрирующая применение алгоритма A-star для решения задачи оптимизации сети маршрутов ОВД.

На этом этапе $open_set^4$ и $close_set^5$ являются пустыми множествами. После определения начальных и конечных ППМ анализируются промежуточные ППМ для инициализации матрицы расстояний. Затем алгоритм использует обработанную матрицу расстояний для идентификации всех возможных последующих ППМ-преемников, добавления их в $open_set$ и вычисления $g(N)$, $h(N)$ и $f(N)$ для каждого ППМ. Из множества $open_set$ выбирается ППМ N_k с минимальным значением функции $f(N_k)$. Если существует несколько ППМ с одинаковым значением $f(N_k)$, алгоритм выбирает любой из них, но всегда отдает предпочтение ППМ из множества K (K – множество, содержащее конечные ППМ). Если $N_k \in K$, ППМ N_k добавляется в множество $close_set$, и алгоритм завершается, что означает, что найден оптимальный путь для маршрута ОВД. В случае, если $N_k \notin K$, ППМ N_k добавляется в множество $close_set$, и процесс поиска продолжается для ППМ N_{k+1} , который является следующим соседним ППМ для N_k , с целью продолжить поиск оптимального пути. На этом этапе ППМ N_k называется родительским узлом (parent) для N_{k+1} .

Далее вычисляется значение $f(N_{k+1})$ для всех соседних ППМ N_{k+1} ППМ N_k , и ППМ, которые не входят в множество $close_set$, добавляются в множество $open_set$. ППМ с минимальным значением $f(N_{k+1})$ выбирается для дальнейшего анализа, который продолжается аналогичным образом, как это было описано выше для ППМ $f(N_k)$.

Процесс поиска завершается, когда конечный ППМ добавляется в список $close_set$. Список ППМ оптимального маршрута от начального ППМ до конечного

⁴ Множество $open_set$ содержит потенциальные узлы, которые помогают алгоритму расширять пространство поиска. Это означает, что все точки в этом множестве могут быть использованы для нахождения оптимального пути для маршрута – m .

⁵ Множество $close_set$ включает узлы, которые уже обработаны или принадлежат сети, но не могут быть использованы для поиска маршрута – m (например, точки, находящиеся в зонах, запрещённых для полётов). Это помогает алгоритму избегать повторного рассмотрения этих узлов в процессе поиска.

формируется, начиная с последнего ППМ, через промежуточные и заканчивая начальным ППМ на основе информации об их родительских ППМ.

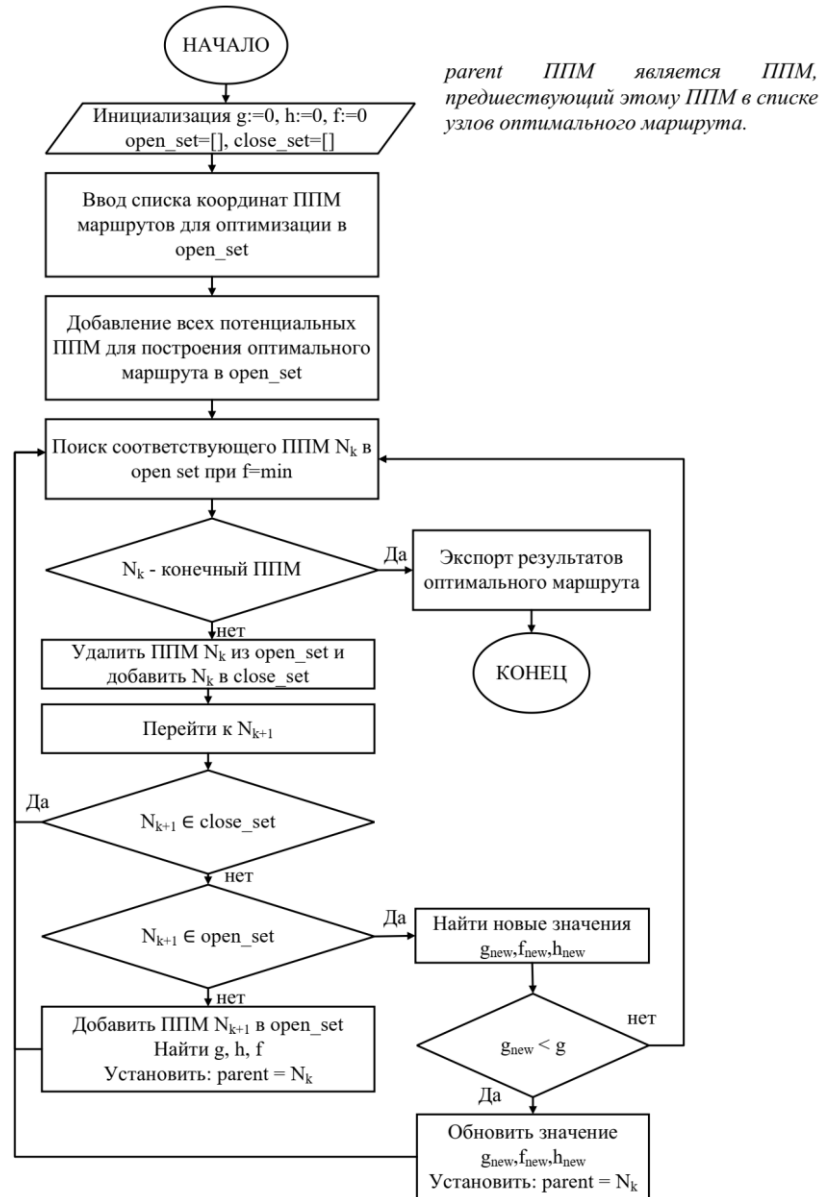


Рисунок 2.5. Блок-схема алгоритма A-star в оптимизации сети маршрутов ОВД

Для оптимизации в сценариях 2 и 3, помимо алгоритма A-star (рисунок 2.5), необходимо учитывать дополнительные ограничения маршрута. На рисунке 2.6 представлена блок-схема алгоритма поиска маршрута, обеспечивающего обход бесполётных зон. На рисунке 2.7 представлена блок-схема алгоритма поиска

оптимального маршрута с использованием алгоритма A-star с учётом угловых ограничений.

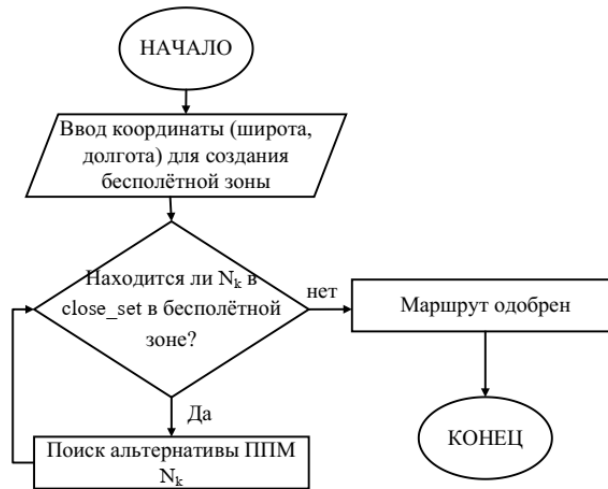


Рисунок 2.6. Блок-схема алгоритма обработки данных бесполётной зоны

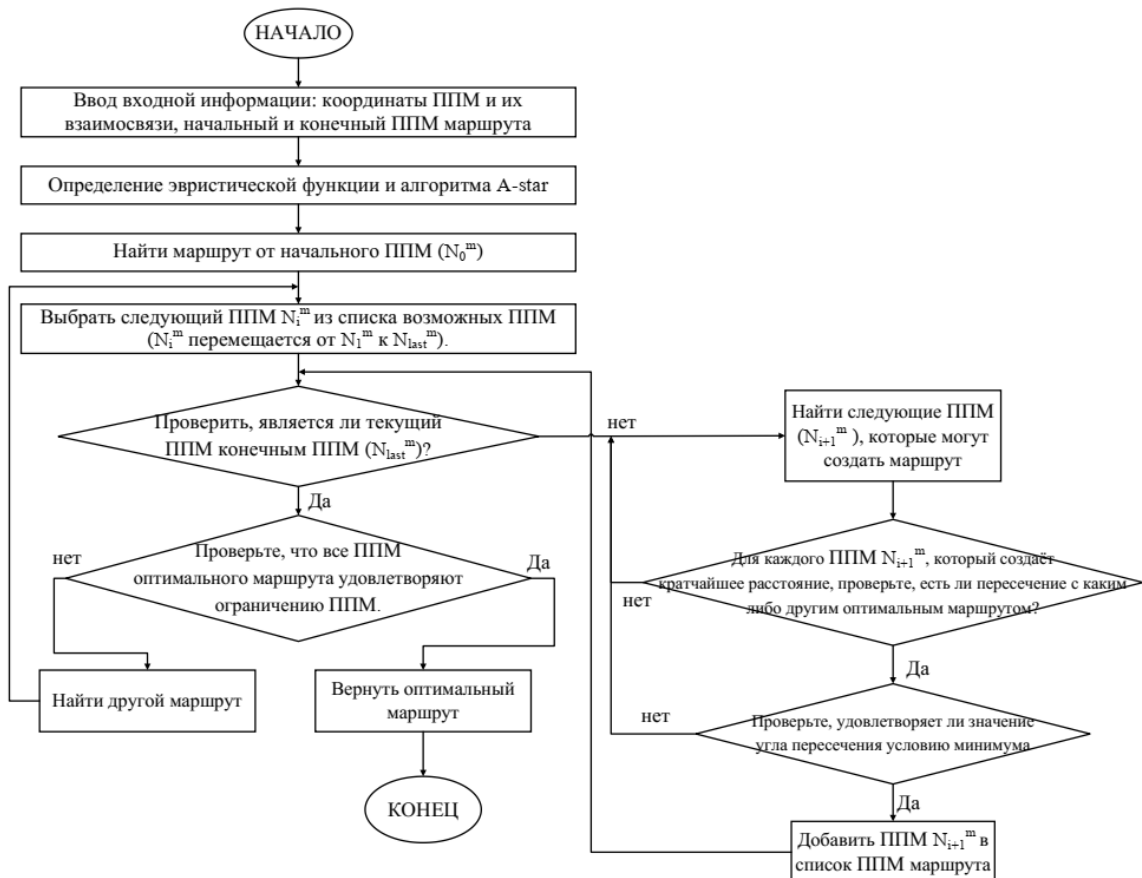


Рисунок 2.7. Блок-схема алгоритма поиска оптимального маршрута с учётом ограничений по углу между пересекающимися маршрутами

Ограничения по углу выполняются на этапе оценки возможных направлений движения для обеспечения достаточного бокового эшелонирования на маршрутах. Алгоритм последовательно проверяет все допустимые узлы, оценивая их стоимость на основе комбинированного критерия, включающего протяжённость маршрута и угол пересечения маршрутов.

2.4. Результаты модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения

В соответствии с уравнением 2.20, эвристическая функция $h(N)$ играет ключевую роль в достижении оптимальных результатов. В данном исследовании была разработана модель, в которой были реализованы различные методы поиска, включая манхэттенскую, евклидову и диагональную функции с параметрами $D = 1$, $D2 = \sqrt{2}$, а также гауссову функцию с параметром $\sigma = 1$ и функцию потенциального поля (ФПП). Для анализа влияния эвристики на оптимизацию маршрутов ОВД использован сценарий 1 с 5 из 20 оптимизируемых маршрутов (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Результаты с применением различных эвристических функций

	Манхэттен	Эвклид	диагональ	Гаусс	ФПП
TSH – DAN	659,3 км TSH - VETOM - BMT - ENGIM - MUMGA - BANSU - SADIN - DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	618,2 км TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - BANSU - SADIN - DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN
CRA – PQU	659,9 км CRA - ELSAS -	602,2 км CRA - SOSPA -	614,4 км CRA - SOSPA -	602,2 км CRA - SOSPA -	602,2 км CRA - SOSPA -

	Манхэттен	Эвклид	диагональ	Гаусс	ФПП
	XOBAV - POTIX - PQU	LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	ENRIN - ENPAS - POTIX - PQU	LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU
TSH – ARESI	1002,2 км TSH - VETOM - SOSPA - KAMGO - DAMEL - MESOX - ARESI	930,2 км TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	931,7 км TSH - VETOM - IBUNU - NITOM - MESOX - ARESI	930,2 км TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	930,2 км TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI
TSH – IGARI	568,3 км TSH - POTIX - QL - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI
PANDI – IGARI	1345,2 км PANDI - ALDAS - OSIXA - MOXON - MELAS - ESPOB - IGARI	1258,2 км PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	1271,6 км PANDI - ALDAS - OSIXA - DAGAG - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	1258,2 км PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	1258,2 км PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI

Анализ данных, приведённых в таблице 2.1, показывает, что эвристическая функция Манхэттена демонстрирует наименее эффективные результаты. Это обусловлено тем, что метод учитывает расстояние между ППМ только по ортогональным осям, не принимая во внимание возможные диагональные перемещения. В то же время, при построении маршрутов ОВД допустимо использование диагональных соединений, которые представляют собой прямой путь между точками и, как правило, обеспечивают минимальное пройденное расстояние. Эвристическая функция с учётом диагоналей демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с Манхэттенской, так как учитывает возможность диагональных перемещений. Тем не менее, она остаётся приближённой, поскольку

не учитывает непрерывные траектории движения, ограничиваясь дискретной оценкой шагов по диагонали, что снижает её точность по сравнению с более совершенными методиками. Наилучшие результаты, достигнутые при применении трёх эвристических функций Евклида, Гаусса и ФПП, оказались идентичными. Это объясняется тем, что эвристические функции Евклида и Гаусса рассчитывают расстояние на основе формулы Евклида, а в случае функции Гаусса результат дополнительно корректируется с учётом стандартного отклонения. Поскольку расчёты выполняются в двумерной системе координат, такая корректировка практически не влияет на итоговые значения. ФПП могла бы проявить более высокую эффективность при наличии ограничений по высоте объектов, однако при моделировании двумерной сети маршрутов ОВД высотные ограничения не учитываются. В связи с этим при разработке сети маршрутов ОВД предпочтение отдавалось эвристической функции Евклида, так как её применение проще и позволяет получить результаты, сопоставимые с сложными эвристическими методами.

В сценарии 2 необходимо ввести координаты и геометрические параметры бесполётных зон для их интеграции в модель оптимизации маршрутов ОВД. В модель включены все запретные зоны, а также опасные и зоны ограничения полётов с верхним пределом от 8000 м или выше (26247 ft). В результате было выбрано 20 бесполётных зон. Такой выбор обусловлен тем, что в ВП РДЦ Хошима ВС находятся на этапе маршрутизированного полёта, достигая установленных ЭП, что обеспечивает стабильность траектории.

Подробное сравнение маршрутов (включая протяженность и ППМ маршрута) для всех трёх сценариев (сценарий 3 включает 2 случая) приведено в таблице 2.2.

Рисунки 2.8, 2.9, 2.10 и 2.11 последовательно иллюстрируют результаты оптимизации 20 маршрутов ОВД, соответствующих сценариям 1, 2 и 3.

Таблица 2.2. Сравнение результатов трёх сценариев оптимизации

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	
			Случай 1	Случай 2
TSH – DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	639,9 км TSH - BUKMA - ENRIN - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN
CRA – PQU	602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	607,1 км CRA - SOSPA - VETOM - ESDOB - TSH - ATGAS - PQU	602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU
TSH – ARESI	930,2 км TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	931,5 км TSH - ESDOB - VETOM - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	931,7 км TSH - VETOM - IBUNU - NITOM - MESOX - ARESI	931,7 км TSH - VETOM - IBUNU - NITOM - MESOX - ARESI
TSH – IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI
TSH – BUNTA	732 км TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA	762,8 км TSH - BUKMA - ENRIN - MULAD - MUMGA - KUMUN - BUNTA	741,6 км TSH - KADUM - PATMA - MEVON - MUMGA - CQ - BUNTA	741,6 км TSH - KADUM - PATMA - MEVON - MUMGA - CQ - BUNTA
DAN – PQU	885,7 км DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU	935,7 км DAN - TATIM - DADEN - MULAD - ENRIN - BUKMA - TSH - ATGAS - PQU	947,4 км DAN - VILOT - XAQUA - ENGIM - BMT - DOVIN - DONXO - POPET -	982,7 км DAN - PATNO - XAQUA - ENGIM - BMT - DOVIN - DONXO - POPET -

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	
			Случай 1	Случай 2
			DADEM - PQU	DADEM - OSOTA - PQU
CRA – BUNTA	539,1 км CRA - KARAN - ASUKU - BUNTA	539,1 км CRA - KARAN - ASUKU - BUNTA	539,1 км CRA - KARAN - ASUKU - BUNTA	553,6 км CRA - KARAN - VIMUT - ITBAM - BUNTA
TSH – DUDIS	424,8 км TSH - XOBAY - LITAM - DUDIS	443,6 км TSH - BITIS - CONDA - DUDIS	424,8 км TSH - XOBAY - LITAM - DUDIS	424,8 км TSH - XOBAY - LITAM - DUDIS
TSH – POPET	82,6 км TSH - POPET	82,6 км TSH - POPET	82,6 км TSH - POPET	82,6 км TSH - POPET
EXOTO – ESPOB	1105,2 км EXOTO - VEPAM - KARAN - ELSAS - CN - ESPOB	1105,2 км EXOTO - VEPAM - KARAN - ELSAS - CN - ESPOB	1105,2 км EXOTO - VEPAM - KARAN - ELSAS - CN - ESPOB	1108,8 км EXOTO - VEPAM - NHATA - ELSAS - CN - ESPOB
DUDIS – DONDA	1027,5 км DUDIS - DAGAG - SUDUN - DAMVO - NITOM - DAMEL - DONDA	1042,6 км DUDIS - DAGAG - ATVIT - DAMEL - DONDA	1042,6 км DUDIS - DAGAG - ATVIT - DAMEL - DONDA	1042,6 км DUDIS - DAGAG - ATVIT - DAMEL - DONDA
MIGUG – MELAS	1110,3 км MIGUG - MESOX - MUGAN - MIMUX - MAPNO - OSIXA - MOXON - MELAS	1110,3 км MIGUG - MESOX - MUGAN - MIMUX - MAPNO - OSIXA - MOXON - MELAS	1162,4 км MIGUG - MESOX - AGSAM - ALDAS - OSIXA - MOXON - MELAS	1162,4 км MIGUG - MESOX - AGSAM - ALDAS - OSIXA - MOXON - MELAS
AKMON – ARESI	788,8 км AKMON - UDOSI - ALDAS - AGSAM - ANOKI - ARESI	788,8 км AKMON - UDOSI - ALDAS - AGSAM - ANOKI - ARESI	852,3 км AKMON - MAPNO - MIMUX - ANOKI - ARESI	852,3 км AKMON - MAPNO - MIMUX - ANOKI - ARESI
CRA – DAN	471,2 км	475,7 км	475,7 км	501,4 км

Маршрут ОВД	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	
			Случай 1	Случай 2
	CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - DAN	CRA - NOBID - BANSU - SADIN - DAN	CRA - NOBID - BANSU - SADIN - DAN	CRA - NOBID - PCA - KUMUN - DAN
TSH – PANDI	806,3 км TSH - BUKMA - MATGI - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI	806,3 км TSH - BUKMA - MATGI - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI	851,8 км TSH - VEPMA - AGSIS - DAMVO - MUGAN - PANDI	851,8 км TSH - VEPMA - AGSIS - DAMVO - MUGAN - PANDI
TSH – AKMON	486,4 км TSH - LOSON - MOXON - AKMON	500,6 км TSH - BUKMA - RUTIT - MOXON - AKMON	486,4 км TSH - LOSON - MOXON - AKMON	486,4 км TSH - LOSON - MOXON - AKMON
PANDI – IGARI	1258,2 км PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	1258,2 км PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	1356,8 км PANDI - ALDAS - DAMVO - SAMAP - LITAM - VIGEN - BITOD - IGARI	1364 км PANDI - ALDAS - DAMVO - SAMAP - LITAM - VIGEN - IPRIX - IGARI
PQU – IGARI	367,3 км PQU - ADBOP - IGARI	380,2 км PQU - SAMOG - IGARI	367,3 км PQU - ADBOP - IGARI	417,4 км PQU - ADBOP - SAMOG - IGARI
ANINA – ARESI	758,5 км ANINA - MUMGA - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI	769,4 км ANINA - BANSU - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI	782,2 км ANINA - MUMGA - VIMUT - DONDA - ARESI	882,5 км ANINA - MUMGA - VIMUT - DONDA - MIGUG - ARESI
PCA – TRN	563,7 км PCA - NOBID - PATMA - DONXO - RUNOP - MOXEB - TRN	600,3 км PCA - KAMGO - ONEBI - AC - BUKMA - TRN	593,9 км PCA - NOBID - ONEBI - ENRIN - ENPAS - TRN	654,3 км PCA - SADAS - BMT - VETOM - LOSON - TRN

Серые круги обозначают радиусы действия навигационных станций VOR/DME, тогда как жёлтые круги отображают зоны охвата навигационных станций NDB в ВП РДЦ Хошимина. Полученные результаты демонстрируют, что все маршруты ОВД на материковой территории, а также большинство маршрутов над акваторией Южно-Китайского моря, находятся в пределах охвата указанных навигационных станций (уравнение 2.10). Для некоторых маршрутов ОВД, где ППМ удалены от суши, установка традиционных средств навигации представляет значительные трудности (например ППМ: MESOX, ARESI). Это приводит к выходу данных ППМ за пределы покрытия наземных средств навигации. Однако внедрение глобальной спутниковой навигации в регионе позволяет использовать PBN, повышая эффективность и БП. Фактически, все ППМ за пределами покрытия наземных средств навигации в ВП РДЦ Хошимина являются точками пути.

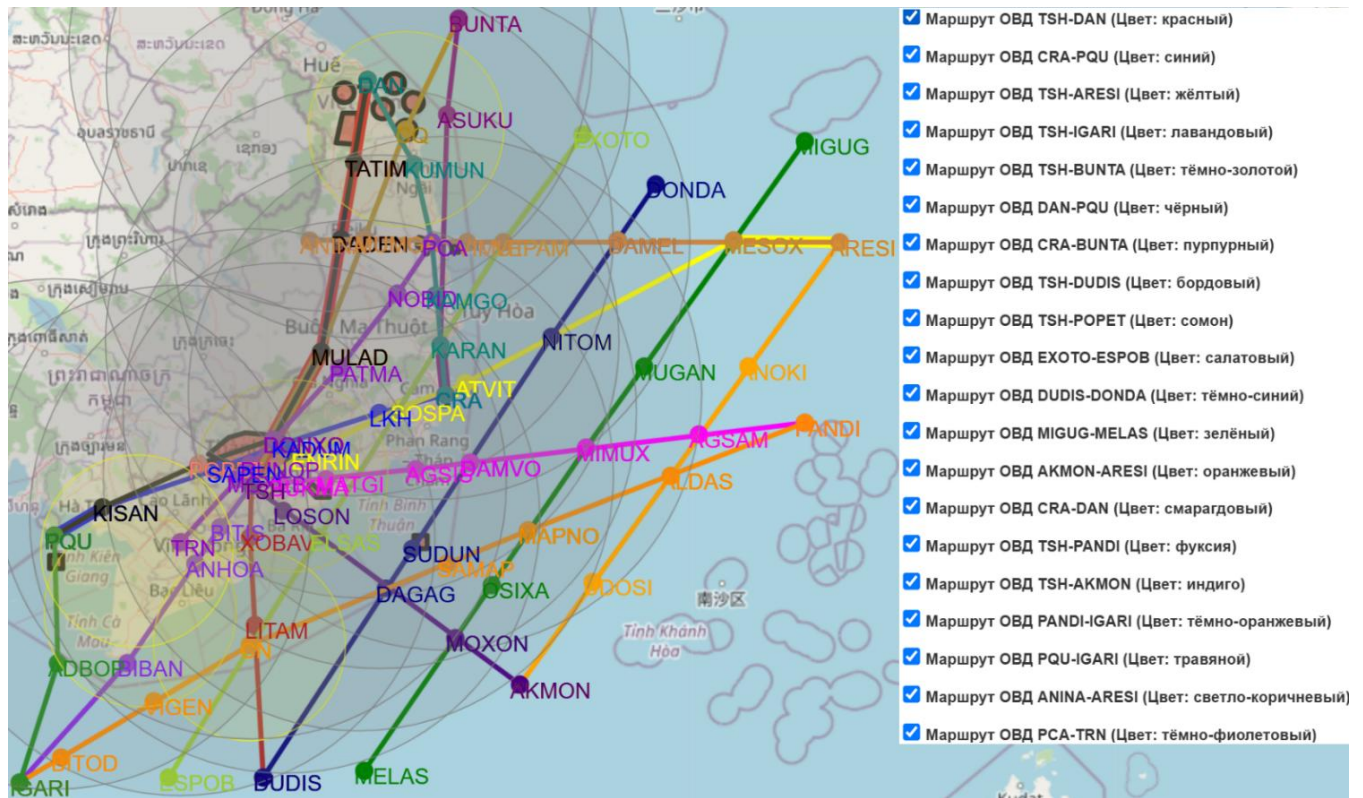


Рисунок 2.8. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в сценарии 1

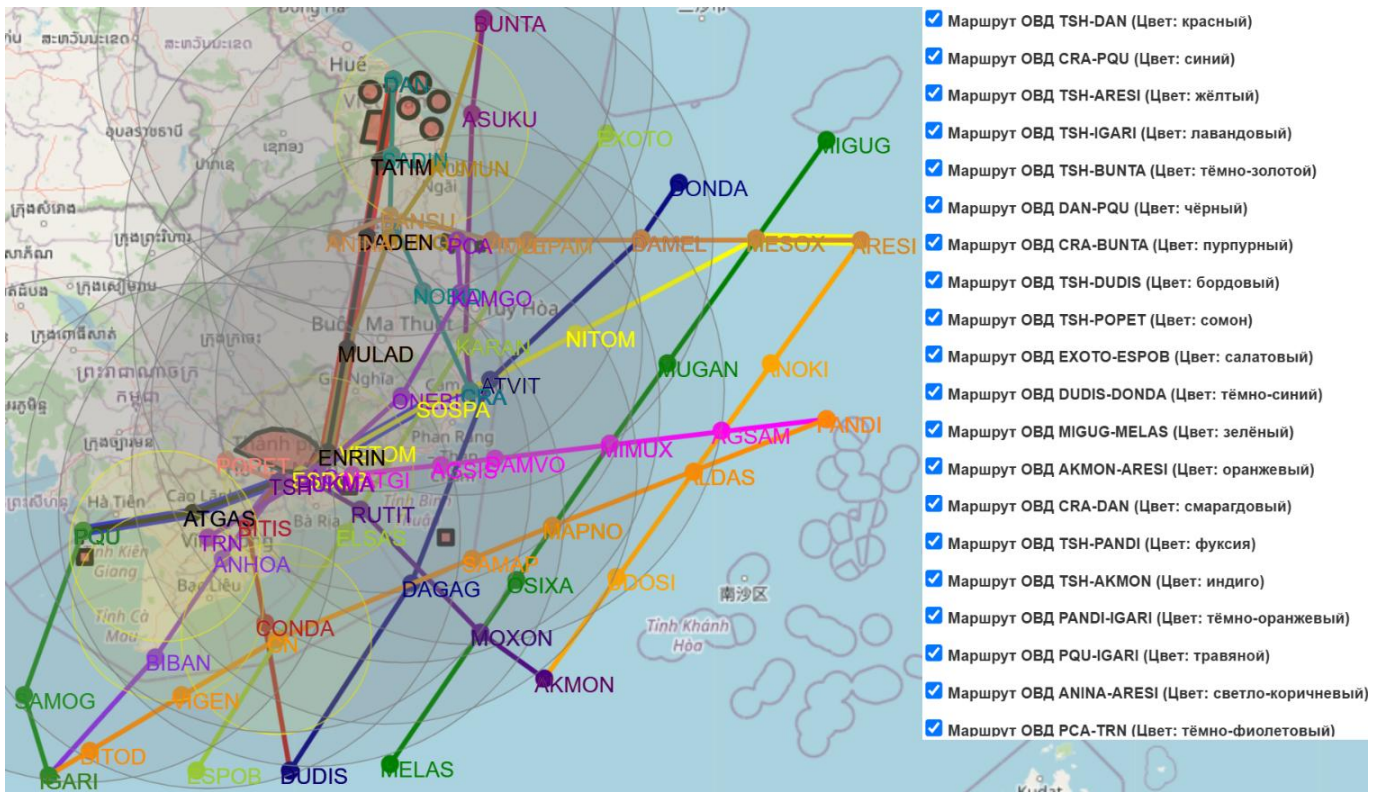


Рисунок 2.9. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в сценарии 2

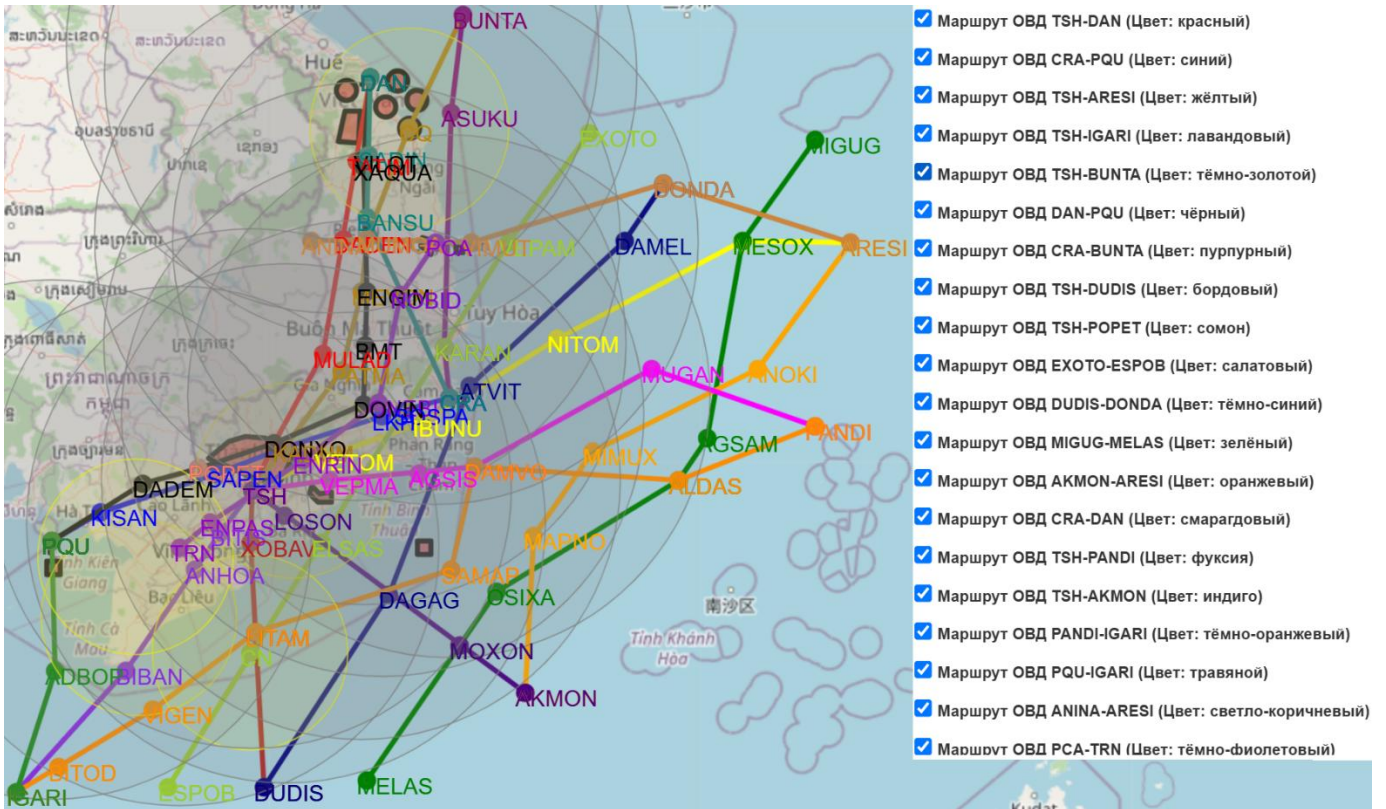


Рисунок 2.10. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в случае 1 сценария 3

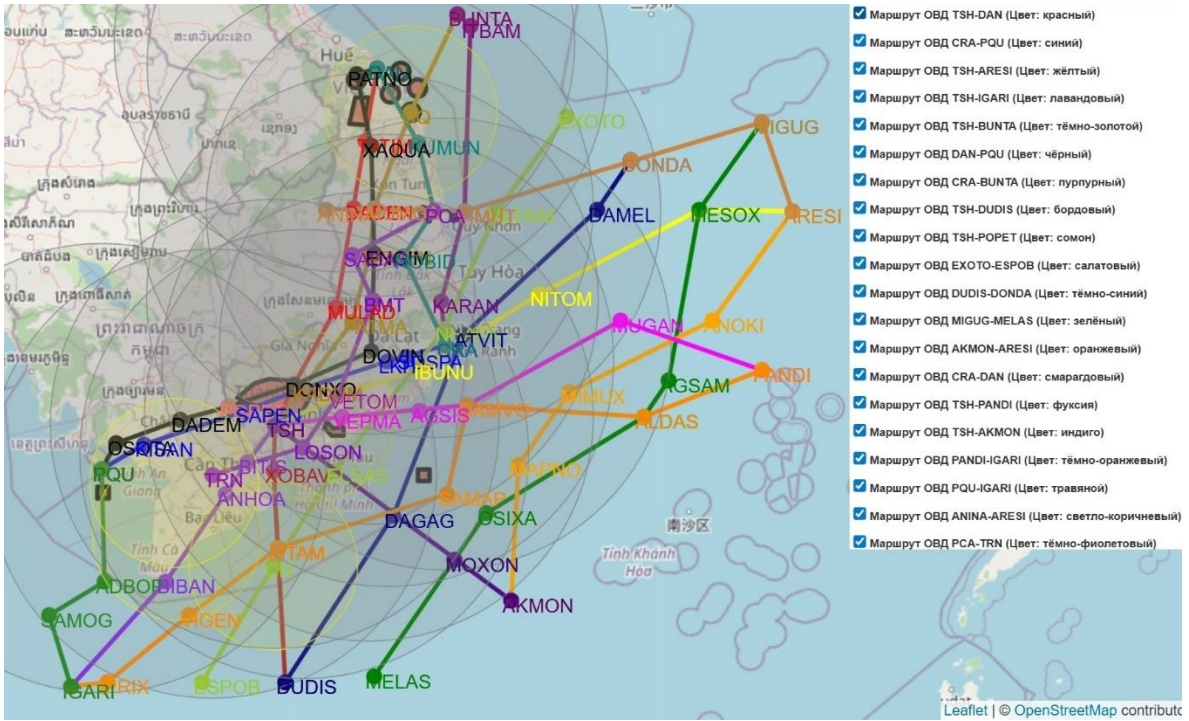


Рисунок 2.11. Оптимальные результаты для 20 маршрутов ОВД в случае 2 сценария 3

Для оценки точности и корректности алгоритма подготовлен файл Excel со сведениями об углах пересечения оптимизационных маршрутов для двух случаев сценария 3. В таблице 2.3 представлены результаты для случая 1, таблица 2.4 — для случая 2. Во второй строке таблицы 2.3 (жёлтой) ППМ ALDAS образуется на пересечении двух сегментов: PANDI – ALDAS маршрута 17 (PANDI – IGARI) и ADLAS – OSIXA маршрута 12 (MIUG – MELAS), формируя угол 169,802°. Для случая 1 вычислено 38 углов, для случая 2 — 75. Все результаты находятся в пределах установленных ограничений.

Таблица 2.3 Частичные результаты расчёта углов в случае 1

	Node	route1	WP_in route1	WP_out route1	route2	WP_in route2	WP_out route2	Angle
1								
2	ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	169.8021
3	ALDAS	route_12	AGSAM	ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	32.84379
4	ALDAS	route_17	ALDAS	DAMVO	route_12	AGSAM	ALDAS	122.7799
5	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	route_17	ALDAS	DAMVO	34.57419
6	DAMVO	route_15	DAMVO	MUGAN	route_17	ALDAS	DAMVO	31.84812
7	DAMVO	route_17	DAMVO	SAMAP	route_15	AGSIS	DAMVO	70.60575
8	DONXO	route_1	TSH	DONXO	route_6	DONXO	POPET	45.65045

Таблица 2.4 Частичные результаты расчёта углов в случае 2

	Node	route1	WP_in route1	WP_out route1	route2	WP_in route2	WP_out route2	Angle
1								
2	AKMON	route_13	AKMON	MAPNO	route_16	MOXON	AKMON	58.08929
3	AKMON	route_16	MOXON	AKMON	route_13	AKMON	MAPNO	58.08929
4	ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	169.8021
5	ALDAS	route_12	ALDAS	OSIXA	route_17	ALDAS	DAMVO	34.57419
6	ALDAS	route_17	ALDAS	DAMVO	route_12	AGSAM	ALDAS	122.7799
7	ALDAS	route_12	AGSAM	ALDAS	route_17	PANDI	ALDAS	32.84379
8	ARESI	route_19	MIGUG	ARESI	route_13	ANOKI	ARESI	124.1509

2.5. Анализ результатов оптимальных сценариев сети маршрутов обслуживания воздушного движения

Анализ данных из таблицы 2.2 позволяет выделить ряд ключевых выводов о влиянии ограничений на результаты построения маршрутов ОБД. Примечательно, что только два маршрута ОБД: TSH – IGARI и TSH – POPET, которые демонстрируют полностью идентичные результаты во всех сценариях (четыре набора результатов). Этот факт указывает на их устойчивость к изменению условий работы алгоритма и сохранение оптимальных параметров при варьировании ограничений. В то же время маршруты DAN – PQU, ANINA – ARESI и PCA – TRN показали полностью различные результаты во всех сценариях. Это свидетельствует о высокой чувствительности данных маршрутов к изменению условий, особенно к необходимости обхода бесполётных зон или соблюдения угловых ограничений на пересечениях маршрутов.

При сравнении результатов сценария 1 и сценария 2, помимо маршрутов TSH – IGARI и TSH – POPET, протяжённость следующих маршрутов: CRA – BUNTA, EXOTO – ESPOB, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI, TSH – PANDI и PANDI – IGARI также остаётся неизменной в обоих сценариях. Это означает, что данные маршруты не подверглись влиянию бесполётных зон, включённых в модель. В общей сложности 12 маршрутов оказались затронутыми бесполётными зонами, что привело к увеличению их протяжённости. Наибольшее влияние оказывает зона ограничения полётов VVR19, которая затрагивает сразу шесть маршрутов ОБД: TSH – DAN, CRA – PQU, TSH – ARESI, TSH – BUNTA, DAN – PQU и PCA – TRN.

При анализе рисунков 2.8 и 2.9, иллюстрирующих маршруты ОБД в сценариях 1 и 2, можно отметить, что для обхода зоны ограничения полётов VVR19 три маршрута: TSH – DAN, TSH – BUNTA и DAN – PQU были спроектированы с тремя общими участками MULAD – ENRIN – BUKMA – TSH. Особенно важно отметить,

что участок BUKMA – TSH также является частью маршрутов TSH – PANDI и TSH – AKMON. В то же время, в сценарии 1 только один участок, MULAD – DONXO, является общим для трёх маршрутов TSH – DAN, TSH – BUNTA и DAN – PQU. Наличие общих участков для нескольких маршрутов ОВД может привести к локальной перегрузке, особенно на участке TSH – BUKMA, поскольку множественные воздушные потоки будут следовать по одному и тому же маршруту, что приведёт к концентрации значительного количества ВС на этих участках. Это, в свою очередь, может вызвать чрезмерную нагрузку на ВП, повысить уровень загруженности и увеличить рабочую нагрузку диспетчеров. Более того, высокая плотность ВД в этих участках может привести к снижению оперативной гибкости в ОПВД, усложнить маневрирование и увеличивать вероятность задержек. В случае неблагоприятных погодных условий или необходимости экстренного изменения маршрута, нагрузка на диспетчеров возрастает ещё больше, что требует дополнительных ресурсов для обеспечения безопасного и эффективного УВД.

При сравнении сценария 1 с обоими случаями сценария 3 можно отметить, что дополнительно появляются четыре маршрута с одинаковой протяжённостью: TSH – DAN, CRA – PQU, TSH – DUDIS и TSH – AKMON. В то же время зафиксированы пять маршрутов с различными результатами, среди которых, помимо трёх уже упомянутых, также CRA – DAN и PANDI – IGARI. Анализ трёх наборов результатов показывает, что сценарий 1 с минимальным числом ограничений обеспечивает наименьшие значения протяжённости маршрутов. В данном случае алгоритм действует в наиболее «свободных» условиях, обеспечивая минимальные дистанции. Наоборот, в случае 2 сценария 3, где установлено максимальное число угловых ограничений, наблюдается увеличение протяжённости, что связано с более жесткими условиями, накладываемыми на построение маршрутов.

При сравнении сценария 1 и случая 1 из сценария 3 можно отметить, что, помимо ранее упомянутых 6 маршрутов, идентичные результаты были получены для следующих маршрутов: CRA – BUNTA, EXOTO – ESPOB и PQU – IGARI. Это

указывает на отсутствие значительного влияния введенных ограничений в случае 1 из сценария 3 на данные маршруты и сохранение их оптимальности. Сравнительный анализ двух случаев в сценарии 3 позволяет выделить следующие маршруты: TSH – ARESI, TSH – BUNTA, DUDIS – DONDA, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI и TSH – PANDI. Эти маршруты демонстрируют одинаковые результаты и имеют большую протяжённость по сравнению с соответствующими маршрутами в сценарии 1. Это свидетельствует о заметном влиянии угловых ограничений, введённых при построении модели оптимизации сети маршрутов ОВД.

При анализе рисунков 2.10 и 2.11, иллюстрирующих маршруты ОВД, в случаях 1 и 2 сценария 3 можно заметить, что для удовлетворения требований по угловым ограничениям на пересечениях маршрутов оптимальные траектории становятся ломанными, часто меняя направление. Эти изменения направлений приводят к созданию сложных маршрутов с многочисленными ППМ, что особенно заметно на следующих маршрутах: DUDIS – DONDA, MIGUG – MELAS, AKMON – ARESI и PANDI – IGARI. Подобная конфигурация маршрутов может создавать значительные трудности при пилотировании и ОВД. Излишняя изломанность маршрутов требует от экипажа повышенного внимания и более частых корректировок курса, что увеличивает когнитивную нагрузку на пилотов и диспетчеров. Кроме того, такие маршруты могут увеличить общее время полёта и расход топлива. Постоянные изменения направления вызывают дополнительные нагрузки на бортовые системы навигации и автопилот, а также могут повлиять на комфорт пассажиров и экипажа из-за частых изменений курса, особенно в условиях турбулентности. В противоположность этому, сценарий 1 и сценарий 2 формируют преимущественно прямолинейные маршруты, которые не только обеспечивают более простой и понятный профиль полёта для экипажа, но и способствуют сокращению эксплуатационных расходов. Такие маршруты уменьшают количество маневров, минимизируя необходимость частых корректировок, что сокращает общее время полёта и снижает расход топлива. Это способствует повышению экономической

эффективности и экологичности. С точки зрения БП, снижение числа маневров уменьшает риск ошибок экипажа и диспетчеров, а также снижает вероятность конфликтных ситуаций с другими ВС в загруженном ВП. При этом более стабильный профиль полёта улучшает комфорт пассажиров и повышает БП.

Кроме того, в случаях 1 и 2 сценария 3 углы пересечения маршрутов вППМ превышают минимальное значение, установленное уравнением 3, что, теоретически, способствует соблюдению бокового эшелонирования диспетчерами при использовании NDB, VOR или GNSS на пересекающихся маршрутах ОВД. Вместе с тем, в реальных условиях, помимо использования бокового эшелонирования, при невозможности или недостаточности его обеспечения диспетчер также может применять вертикальное и продольное эшелонирование для обеспечения безопасного и эффективного УВД. Следовательно, преимущества, которые потенциально могут дать сценария 3, не настолько значительны, чтобы перевесить их недостатки при применении, особенно в ВП Вьетнама. Особенности расположения государственной границы Вьетнама, обуславливающие ограничения ИВП в приграничной полосе, создают дополнительные сложности для обеспечения безопасного эшелонирования.

Следовательно, несмотря на очевидные достоинства, присущие сценарию 3, его внедрение может оказаться менее эффективным, чем ожидалось, особенно в условиях плотной и сложной воздушной обстановки. Хотя данный сценарий теоретически обеспечивает оптимизацию маршрута с учётом угловых ограничений на точках пересечения, сценарий 1 сохраняет статус наиболее рационального выбора для практического применения. Он гарантирует сбалансированное сочетание эксплуатационной эффективности, экономической целесообразности и безопасности, что делает его предпочтительным инструментом при планировании маршрутов ОВД. Тем не менее, сценарий 3 может эффективно использоваться в условиях, когда большой пространственный объем позволяет сформировать относительно бесконфликтную структуру ВП, и в случае изменения воздушной,

аэронавигационной или метеорологической обстановки на маршруте по плану, применение сценария 3, при относительно больших расстояниях между ППМ, обеспечивает гибкость и высокую эффективность альтернативных маршрутов.

2.6. Планирование использования сети маршрутов обслуживания воздушного движения

Как показано в анализе в разделе 2.5, результаты обоих случаев в сценарии 3 не соответствуют ВП РДЦ Хошимина. Таким образом, для дальнейшего рассмотрения принимаются только результаты сценариев 1 и 2. В этой связи предлагаются три возможных варианта.

- **Вариант 1:**

Предлагается применить сценарий 2 ко всему ВП РДЦ Хошимина. Данный вариант обладает рядом преимуществ, прежде всего, простотой реализации и удобством ИВП. Однако его применение сопровождается рядом существенных недостатков, которые могут негативно сказаться на эффективности ВД.

Прежде всего, протяжённость ряда маршрутов ОВД увеличится на значительную величину, что приведёт к повышенному расходу топлива и увеличению времени полёта. Например, протяжённость маршрута DAN – PQU возрастёт на 50 км (5,7 %), а маршрута PCA – TRN увеличится на 36,6 км (6,5 %). Эти изменения могут существенно повлиять на операционные затраты авиакомпаний, а также снизить общую эффективность воздушного сообщения в регионе.

Кроме того, анализ показал, что в данном сценарии формируется множество маршрутов ОВД, проходящих через одни и те же участки. Это приводит к локальному увеличению плотности воздушного трафика. Локальное увеличение

плотности воздушного трафика усложняет УВД, увеличивая время обработки разрешений и необходимость введения регуляторных мер, таких как ограничение потока или изменение ЭП. Это, в свою очередь, может привести к каскадному эффекту задержек, распространяющихся на региональную сеть ВД.

Помимо этого, концентрация маршрутов на ограниченных участках ВП повышает риск нарушения минимально допустимых интервалов эшелонирования между ВС, что требует усиленного мониторинга и оперативного вмешательства диспетчеров для обеспечения безопасных условий полётов. В долгосрочной перспективе такая конфигурация маршрутов может потребовать пересмотра структуры ВП, внедрения динамического управления маршрутами и более эффективных алгоритмов стратегического планирования ВД.

Более того, в данной модели рассматриваются 20 бесполётных зон, некоторые из которых имеют верхний вертикальный предел 8000 м. Эти зоны влияют на 12 маршрутов, включая международные воздушные маршруты, на которых ВС, как правило, выполняют полёты на ЭП выше этого ограничения. В результате данные бесполётные зоны не оказывают прямого влияния на траектории полётов. Однако необходимость обхода данных зон и использования удлиненных маршрутов может привести к неоправданным затратам на топливо, увеличению времени полёта и, как следствие, снижению эффективности воздушного сообщения в регионе.

- Вариант 2:

Разделение ВП РДЦ Хошимина на две зоны по высоте предполагает выделение нижнего ВП с границами от поверхности земли и воды (за исключением зон ТМА и TWR в данном районе) до ЭП260 (8000 м) включительно, а также верхнего ВП, простирающегося от ЭП260 до ЭП460 включительно. В рамках данной структуры маршрутов ОВД предусматривается применение сценария 2 для нижней зоны и сценария 1 для верхней зоны. Тем не менее, в верхнем ВП необходимо учитывать наличие бесполётных зон, таких как VVR19, которая оказывает влияние на шесть маршрутов ОВД. Кроме того, существует ряд опасных зон, включая VVD76,

затрагивающую маршруты PQU – IGARI, VVD74, влияющую на маршрут DUDIS – DONDA, и VVD58, связанную с маршрутом PCA – TRN. Эти бесполётные зоны представляют собой ограниченные ВП с неопределёнными вертикальными границами, поскольку используются для проведения военных учений и испытаний, а также для гражданских стрельбищ и военных полигонов. В некоторых случаях их влияние может распространяться выше ЭП260, поэтому маршруты, проходящие через зоны, следует классифицировать как временные маршруты (*conditional route*), что требует повышенного контроля и гибкости в УВД.

Преимущества предлагаемой структуры ВП заключаются в её способности эффективно использовать сильные стороны обоих сценариев. Разделение зон по высоте позволяет оптимизировать предоставление ОВД, особенно в нижнем ВП. Это обусловлено тем, что маршруты ОВД в этом ВП разработаны с учётом обхода бесполётных зон, благодаря чему диспетчерам не приходится уделять внимание деятельности в этих зонах при оказании ОВД. Это, в свою очередь, снижает нагрузку на диспетчеров и упрощает УВД на низких ЭП. Кроме того, такая организация способствует уменьшению объёма координации между ГА и государственными авиационными структурами при ОрВП.

Однако данная структура имеет определённые недостатки. Одним из ключевых вызовов является необходимость усиленной координации между диспетчерскими секторами при изменении ЭП. В частности, если ВС пересекает границу ЭП260, требуется согласование между диспетчерами нижнего и верхнего ВП, что может увеличивать нагрузку на систему УВД. Дополнительно, структура ВП становится более сложной, поскольку используются две разные сети маршрутов ОВД, что потенциально может вызывать путаницу при предоставлении диспетчерских услуг. Особенно это актуально в ситуациях, когда диспетчеры вынуждены работать в условиях высокой загруженности, где потеря концентрации может привести к ошибкам в УВД.

- Вариант 3:

Сеть маршрутов ОВД строится в соответствии со сценарием 1, однако 12 маршрутов, проходящих через бесполётные зоны, организуются в виде временных маршрутов, а для этих маршрутов предусматриваются запасные маршруты, взятые из сценария 2. При активации бесполётных зон, в зависимости от установленных высотных ограничений и характера воздушных операций, диспетчеры будут принимать решения о выборе наиболее оптимального маршрута для обеспечения безопасности, эффективности и непрерывности ВД.

Предложенная ОрВП обладает рядом существенных преимуществ. В отличие от сценария 2, она предусматривает более упрощённую структуру ВП, обеспечивая при этом достаточную степень гибкости и адаптивности к изменяющимся условиям эксплуатации бесполётных зон. Минимизация вертикального сегментирования ВП упрощает процесс координации между различными секторами, что особенно важно при пересечении границ зон ответственности. Кроме того, маршруты ОВД строятся с минимальной протяжённостью, что позволит снизить расход топлива, уменьшить время полёта и, следовательно, повысить экономическую эффективность воздушных перевозок, а также сократить выбросы CO₂, способствуя снижению экологического воздействия авиации. Данный подход соответствует рекомендациям ИКАО по созданию динамичного и гибкого ВП, способного адаптироваться к оперативным требованиям и меняющимся условиям.

Однако у данного метода также есть определённые недостатки. Реализация требует усиления координации между органами ГА и органами государственной авиации в управлении статусом бесполётной зоны, что влечёт за собой необходимость более оперативного обмена информацией и чёткого взаимодействия между соответствующими службами. Более того, данный вариант предъявляет повышенные требования к диспетчерам, которые должны обладать высокой степенью адаптивности, оперативностью в принятии решений и гибкостью при выборе маршрутов в режиме реального времени в зависимости от текущей обстановки в ВП.

Выбор варианта использования

В зависимости от требований пользователей ВП и гражданских авиационных органов, организация сети маршрутов ОВД может основываться на одном из трёх возможных сценариев. Однако в рамках данного исследования, с целью более детального анализа планирования использования сети маршрутов ОВД, а также разработки программы поиска альтернативных маршрутов (обсужденной в главе 3), в качестве основного будет выбран и применён третий вариант.

После выбора оптимального варианта проанализирована текущая ситуация с ВД, так как маршрут TSH – DAN является самым загруженным в ВП РДЦ Хошимина (частью маршрута TSH – международный аэропорт Ной Бай, который занимает четвертое место по загруженности среди внутренних маршрутов в мире [77]). Этот маршрут обеспечивает связь между Севером (включая север Вьетнама, Китай, Россию и другие страны) и Югом (включая юг Вьетнама, Сингапур, Индонезию, Австралию и другие страны). В связи с этим, для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ВП, предлагается создание параллельного маршрута к оптимальному маршруту TSH – DAN с использованием методики RNAV 5 [78]. Параллельный маршрут проложен через аэропорт Буонметхуот (BMT), что облегчает выполнение рейсов в этот аэропорт и из него, исключая необходимость создания дополнительных второстепенных маршрутов. Параллельный маршрут соединён с участком TSH – ENRIN в точке THALY и направляется в сторону TSH (рисунок 2.12). Этот параллельный маршрут последовательно проходит через ППМ, имеющие следующие широты и долготы: HAMTA (15,959; 108,707) – VISAO (14,887; 108,529) – NASEN (13,905; 108,353) – BMT (12,666; 108,123) – LEMAN (12,454; 108,084) – HESIN (11,329; 107,461) – THALY (11,243; 107,418) – ENRIN (11,191; 107,324) – TSH (10,818; 106,651) и имеет протяжённость 644,1 км. Таким образом, будут созданы два параллельных маршрута, которые будут использоваться в одностороннем режиме: первоначальный маршрут предназначен для полётов с юга на север, а новый параллельный маршрут – для полётов в обратном направлении.

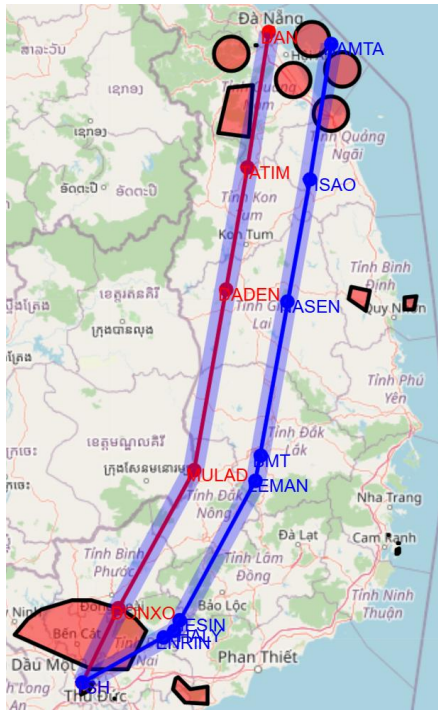


Рисунок 2.12. Пара маршрутов ОВД Север-Юг разработана с применением RNAV 5

При анализе рисунка 2.12 видно, что воздушные коридоры маршрутов, предназначенные для применения RNAV 5 (уравнение 2.11), обозначены прямоугольной зоной синего цвета, простирающейся на 5 морских миль в каждую сторону. Кроме того, согласно документу 9613 [78], ИКАО рекомендует, что при проектировании двух параллельных маршрутов ОВД с использованием RNAV 5 необходимо обеспечивать: интервал между маршрутами в 16,5 морских миль для движения в одном направлении и 18 морских миль для движения во встречном направлении в зоне наблюдения ОВД. Более того, в радиолокационной среде, где возможно вмешательство органов УВД, допускалось сокращение интервала до 10 морских миль. Вместе с тем, при текущем подходе к проектированию два параллельных маршрута имеют интервал 57,5 км (31,1 морских миль), что полностью соответствует требованиям ИКАО и удовлетворяет условиям уравнения 2.18. Также на рисунке 2.12 можно заметить, что параллельные маршруты ОВД пересекают две бесполётные зоны – VVR11 и VVR18, имеющие форму окружности. Однако верхний вертикальный предел этих зон составляет всего 8000 м (26246

футов), тогда как данный параллельный маршрут предназначен для полётов ВС по направлению с севера на юг таким образом, что к моменту достижения точки НАМТА ВС уже набирают крейсерский ЭП, превышающий ЭП270, что исключает их попадание в бесполётные зоны. В случае если по техническим причинам или из-за погодных условий ВС потребуется снижение ниже ЭП270, диспетчер может воспользоваться функцией поиска альтернативного маршрута (см. главу 3).

Для четырёх маршрутов ОВД, которые проходят параллельно друг другу в районе Южно-Китайского моря, а именно: EXOTO – ESPOB, DUDIS – DONDA, MIGUG – MELAS и AKMON – ARESI, с целью повышения эффективности ОрВД, снижения перегрузок и минимизации рисков возникновения ПКС, предлагается установить данные маршруты в качестве односторонних маршрутов. Такое распределение позволит сократить вероятность встречных потоков на одних и тех же ЭП, повысит степень БП, упростит процесс контроля и наблюдения за ВС, снизит риск возникновения ПКС и обеспечит более эффективное ОПВД в данном районе. При этом маршруты EXOTO – ESPOB и MIGUG – MELAS будут использоваться для полётов с севера на юг и с востока на запад, а оставшиеся два маршрута будут предназначены для полётов с юга на север и с запада на восток. Для указанных маршрутов предлагается применять спецификацию RNP 4, обеспечивающую высокую точность навигации. В случае ухудшения характеристик оборудования возможно использование RNP 10, поскольку расстояние между параллельными маршрутами удовлетворяет требованиям для безопасной эксплуатации. Такой подход обеспечивает гибкость в ОВД и соблюдение стандартов безопасности. Согласно документу ИКАО 9613 [78], при применении RNP 4 рекомендуется, чтобы максимальный интервал между параллельными маршрутами в различных случаях проектирования составлял 42,6 км (23 морские мили). В то же время при применении RNP 10 во всех случаях проектирования требуется интервал 93 км (50 морских миль). Фактически построенные пары параллельных маршрутов имеют расстояние между собой от 150 км (81 морских миль) до 165 км (89 морских миль).

Очевидно, что данные интервалы полностью соответствуют требованиям ИКАО и удовлетворяют условиям уравнения 2.18.

Следующий этап заключается в создании дополнительных вспомогательных маршрутов ОВД, что повышает эффективность УВД и оптимизирует потоки ВД. Внедрение 10 маршрутов между внутренними аэропортами и 3 маршрутов, соединяющих ключевые вспомогательные точки передачи управления, позволяет сформировать полноценную и сбалансированную сеть маршрутов ОВД, обеспечивающую более эффективное ИВП. В их числе: LKH – BMT, TSH – PLK, TSH – RG, TSH – VTV, VTV – CN, XONAN – IGARI, DADEM – CN, KISAN – IPRIX, TSH – TRN, TSH – QL. Рисунок 2.13 представляет собой полную сеть маршрутов ОВД в ВП РДЦ Хошимина после добавления вспомогательных маршрутов ОВД.

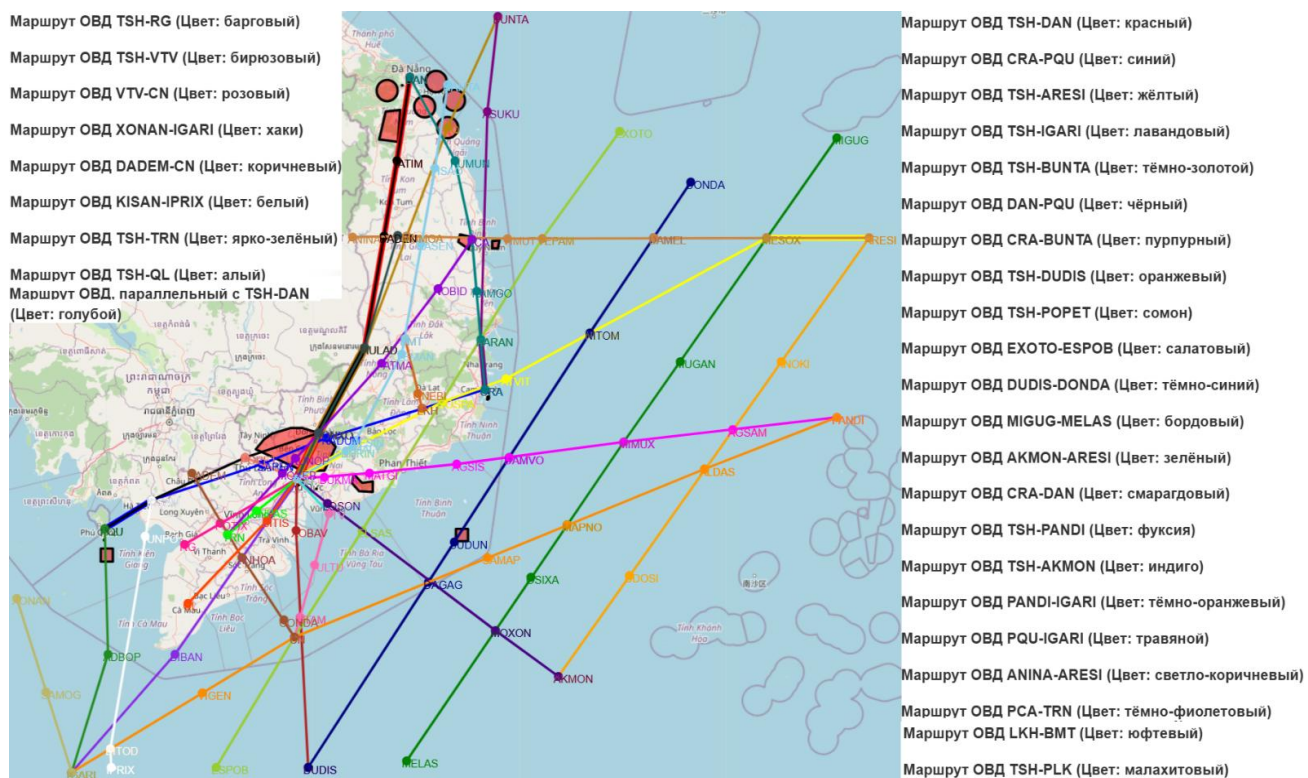


Рисунок 2.13. Полная сеть маршрутов ОВД в ВП РДЦ Хошимина

Последним этапом разработки сети маршрутов ОВД является определение верхнего и нижнего вертикальных пределов на маршрутах. Этот процесс требует

детального и всестороннего анализа множества факторов, чтобы гарантировать БП, эффективность ИВП и соответствие международным стандартам авиации. Нижний вертикальный предел устанавливается на основе минимальной безопасной высоты, определённой Управлением ГА Вьетнама (рисунок 2.14), с учётом соглашений с государственными авиационными органами других стран, а также возможностей инфраструктуры связи (VHF) и средств наблюдения (ВОПЛ, ADS-B) во Вьетнаме. В настоящее время в районе Южно-Китайского моря зона покрытия VHF во Вьетнаме недостаточна для обеспечения устойчивой связи на эшелонах ниже ЭП130, что приводит к нестабильности и прерывистости сигнала. В результате, для устранения этих рисков нижний вертикальный предел в данном регионе был установлен на уровне ЭП135 что позволяет поддерживать устойчивую связь и БП. Нижние вертикальные пределы для тридцати одного маршрута ОВД, разработанные с учётом вышеуказанных факторов, подробно представлены в таблице 2.5.

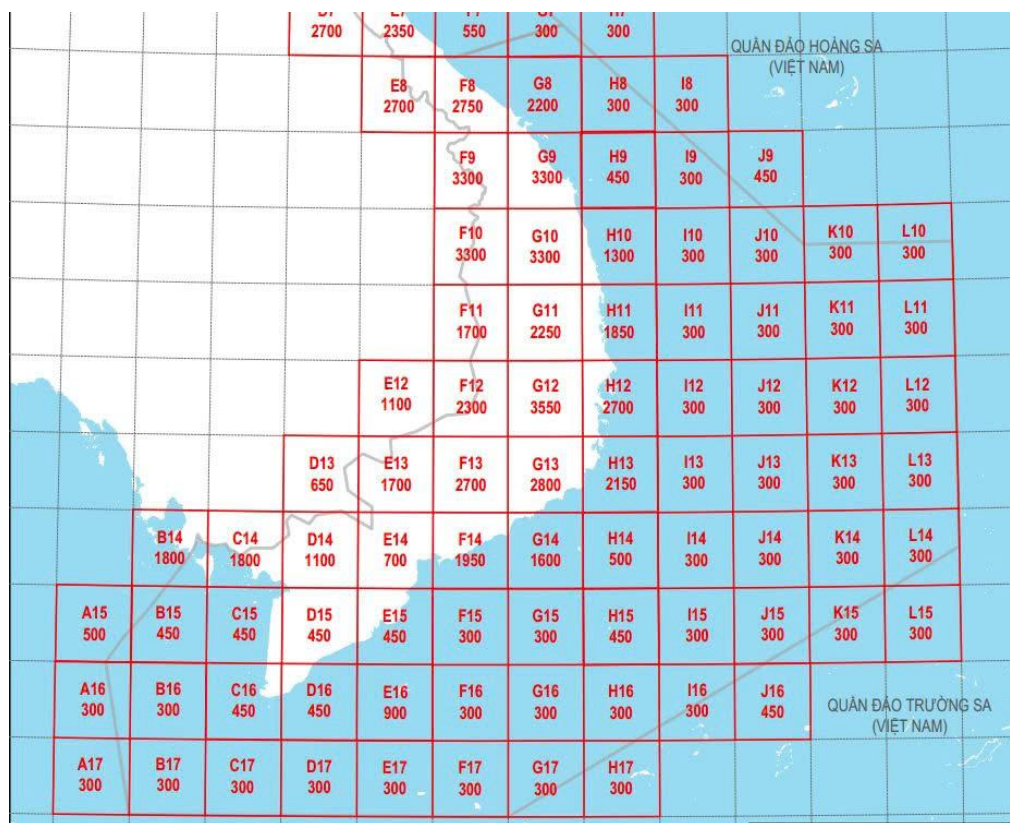


Рисунок 2.14. Схема минимальной безопасной высоты в ВП РДЦ Хошимина

Таблица 2.5. Нижний вертикальный предел на маршрутах

Маршрут ОВД	нижний предел	Маршрут ОВД	нижний предел	Маршрут ОВД	нижний предел
TSH – DAN	ЭП105	DUDIS – DONDA	ЭП135	LKH – BMT	ЭП100
CRA – PQU	ЭП105	MIGUG – MELAS	ЭП135	TSH – PLK	ЭП105
TSH – ARESI	ЭП135	AKMON – ARESI	ЭП135	TSH – RG	ЭП040
TSH – IGARI	ЭП135	CRA – DAN	ЭП105	TSH – VTV	ЭП050
TSH – BUNTA	ЭП105	TSH – PANDI	ЭП135	VTV – CN	ЭП050
DAN – PQU	ЭП105	TSH – AKMON	ЭП135	XONAN – IGARI	ЭП135
CRA – BUNTA	ЭП100	PANDI – IGARI	ЭП135	DADEM – CN	ЭП100
TSH – DUDIS	ЭП135	PQU – IGARI	ЭП135	KISAN – IPRIX	ЭП135
TSH – POPET	ЭП080	ANINA – ARESI	ЭП135	TSH – TRN	ЭП040
EXOTO – ESPOB	ЭП135	PCA – TRN	ЭП105	TSH – QL	ЭП040
HAMTA – TSH	ЭП105				

Что касается верхнего вертикального предела, применяется ЭП460, так как он является максимальным ЭП, на котором в настоящее время обеспечиваются УВД в ВП Вьетнама. Однако в будущем, по мере совершенствования аэронавигационной системы, модернизации технических средств ОВД и разработки более эффективных методов управления в рамках ОВД, верхний вертикальный предел может быть увеличен. В качестве перспективных вариантов рассматриваются ЭП500 и ЭП540, что позволит расширить эксплуатационные возможности ВП и повысить его ПС. Конкретное решение о повышении верхнего предела будет приниматься на основании комплексного анализа эксплуатационных условий, доступности необходимых технических средств, требований БП и международных стандартов аэронавигационного обслуживания. Кроме того, важным фактором останется согласование данных изменений с международными авиационными учреждениями и соседними странами с целью поддержания эффективной координации полётов в прилегающих ВП.

Выводы по главе 2

1. Была создана математическая модель оптимизации, предназначенная для изучения характеристик маршрутов ОВД с целью формирования их рациональной сети, упорядоченной согласно трём сценариям. Модель ориентирована на проектирование оптимальной сети маршрутов ОВД, которая удовлетворяет заданной целевой функции и конкретным ограничениям исследуемого ВП, позволяя выявить наиболее эффективные маршруты на основе установленных параметров.

2. Проведен детальный анализ и сравнительная оценка различных алгоритмов оптимизации, что позволило обоснованно выбрать алгоритм A-star в качестве наиболее подходящего метода решения задачи оптимизации сети маршрутов ОВД. Его применение обосновано высокой вычислительной эффективностью, точностью и возможностью адаптации к сложным условиям ВД.

3. Были разработаны методы применения алгоритма A-star для оптимизации сети маршрутов ОВД в соответствии с тремя предложенными сценариями в математическая модель оптимизации. Результаты сети маршрутов для каждого сценария соответствуют и удовлетворяют математическим уравнениям и модели оптимизации.

4. Выполнено детальное сравнение и углубленный анализ полученных результатов на основе теоретических принципов ОрВД, ОрВП и ИВП. Доказана их научная обоснованность и практическая применимость.

5. Разработаны и предложены три варианта внедрения результатов оптимизации маршрутной сети ОВД в реальную эксплуатацию. Каждое из решений было всесторонне проанализировано с точки зрения преимуществ и недостатков, после чего был выбран наиболее подходящий вариант для внедрения в ВП РДЦ Хошмина. Выбранный вариант подвергся детальному анализу для разработки полноценной сети маршрутов ОВД.

6. Оптимизированная сеть маршрутов ОВД была сопоставлена с реальными данными, что позволило убедительно продемонстрировать эффективность предложенного алгоритма и модели. Анализ показал, что внедрение данной оптимизационной методики может привести к значительному улучшению показателей ВД.

7. Предложенная модель оптимизации отличается гибкостью и применимостью к различным ВП. Благодаря возможности изменения входных данных она эффективно работает в разных условиях и регионах, становясь полезным инструментом для планирования и оптимизации сети маршрутов ОВД.

Глава 3. Разработка оптимизационной модели для динамической ремаршрутизации в условиях недоступности основных маршрутов ОВД

3.1. Состояние исследований динамических моделей ремаршрутизации маршрутов ОВД в мире

После разработки оптимальной сети маршрутов ОВД крайне важно планировать и разрабатывать резервные варианты для её эксплуатации. Существует множество факторов риска, которые могут сделать использование определённого маршрута ОВД невозможным на практике, включая погодные условия, технические неисправности и угрозы национальной безопасности. В случае возникновения инцидентов в аэропорту или ВП необходима динамическая ремаршрутизация маршрутов ОВД для обеспечения БП, минимизации экономических потерь и поддержания стабильности авиационной системы. Этот процесс требует сложных алгоритмов, анализа данных в реальном времени и координации между авиакомпаниями, органами ОВД и аэропортами. С ростом интенсивности ВД увеличивается потребность в интеллектуальных методах управления кризисами.

Один из новейших подходов к разработке передовых стратегий ремаршрутизации заключается в построении оптимизационных моделей, использующих последние достижения в области компьютерных технологий, в частности искусственного интеллекта и алгоритмов оптимизации. Эти технологии позволяют обрабатывать большие объёмы данных, прогнозировать возможные нарушения и в режиме реального времени генерировать оптимальные решения для изменения маршрутов. Однако, несмотря на значительный потенциал, применение этих инноваций к динамической ремаршрутизации остается областью исследований,

которой уделяется недостаточно внимания. Большинство существующих работ рассматривают лишь смежные темы, не решая эту проблему напрямую.

Несколько значимых исследований рассматривали методы оптимизации, применимые к корректировке траекторий. Ху и др. [79] предложили совместную структуру ОПВД, использующую метод смешано-целочисленного линейного программирования для оптимизации экономически эффективных корректировок траекторий и минимизации задержек для пользователей ВП. Аналогично, Yang и др. [80] разработали модель робастной оптимизации, предназначенную для повышения адаптивности и эффективности ремаршрутизации рейсов в условиях неопределенности, вызванной неблагоприятной погодой. Другое исследование сосредоточилось на создании надежной оптимизационной структуры для отклонения рейсов в условиях неопределенности, учитывая баланс между интересами заинтересованных сторон и эксплуатационной эффективностью [81]. Кроме того, Rosenow и др. [82] разработали модель оптимизации, уточняющую траектории полётов на основе прогнозов погоды с целью повышения топливной эффективности и улучшения ОрВД. Ряд других примечательных исследований по оптимизации траекторий полётов ВС также заслуживает внимания [83 - 86]. Еще одно направление исследований связано с управлением заранее определенными аварийными сценариями, которое играет ключевую роль в обеспечении устойчивости и адаптивности авиационной системы в условиях неопределённости [87 - 89]. Однако эти исследования в основном сосредоточены на тактической и предтактической оптимизации траекторий в реальном времени, а также на разработке резервных решений для аварийных ситуаций, вместо создания комплексной модели, способной определять альтернативные маршруты при недоступности основных. Этот пробел открывает перспективное направление для разработки усовершенствованной оптимизационной модели, обеспечивающей динамическую ремаршрутизацию на различных этапах ОПВД с учётом операционных ограничений и целевых функций.

3.2. Модель динамической ремаршрутизации маршрутов ОВД

С учётом преимуществ, изложенных в разделе 2.3, алгоритм A-star был использован для построения модели динамической ремаршрутизации маршрутов ОВД. Данная модель рассматривала две возможные ситуации:

- **первая ситуация** - один или несколько ППМ становятся недоступными. Они могут являться как окончанием маршрута, так и промежуточными поворотными пунктами на маршруте. Данная ситуация соответствует реальным условиям, при которых, например, выходит из строя радиомаяк, обеспечивающий навигацию, либо закрывается аэропорт из-за технических неисправностей, неблагоприятных метеоусловий или авиационного инцидента, в результате которого ВПП оказывается недоступной;

- **вторая ситуация** предполагает более масштабные ограничения, когда недоступными становятся не только отдельные ППМ, но и определенные участки ВП (далее обозначенные как зоны ограничения полётов - ЗОП⁶). Эта ситуация отражает неблагоприятные погодные условия на обширной территории или ограниченную ПС ВП. В связи с этим поиск оптимального решения для ремаршрутизации становится более сложным, поскольку ВС необходимо назначить альтернативный маршрут, обходящий значительно большую ЗОП, при этом соблюдая правила полётов и обеспечивая БП.

В контексте ОПВД изменение маршрутов ОВД может происходить на разных этапах планирования ИВП: стратегическом, предтактическом и тактическом, каждый из которых имеет свои цели и временные рамки. Стратегический этап направлен на долгосрочное планирование, оптимизацию структуры ВП и его ПС. Предтактический этап включает корректировку маршрутов на основе обновленных

⁶ Министерство транспорта РФ. Приказ от 24 ноября 2025 года № 410 «Об установлении постоянных зон ограничения полетов и временных зарезервированных зон ограничения полетов».

прогнозов спроса на ВД и возможных ограничений ПС. Тактический этап требует оперативного принятия решений в реальном времени для устранения немедленных сбоев, таких как неблагоприятные погодные условия, временные ограничения ВП или его внезапная перегруженность. Таким образом, необходимо разработать гибкую и адаптивную модель, способную эффективно реагировать на динамичный характер развития этих ситуаций. Такая модель должна не только учитывать различия в целях и временных характеристиках каждого этапа, но и способствовать повышению общей эффективности, БП и устойчивости системы ОрВД.

Предлагаемая модель направлена на решение задачи поиска оптимальных альтернативных маршрутов ОВД для двух вышеуказанных ситуаций. Каждая ситуация включает три сценария, а основная цель заключается в минимизации протяжённости маршрутов ОВД после их изменения, при этом учитываются дополнительные специфические ограничения условий эксплуатации, соответствующие каждому этапу ОПВД:

- **сценарий 1:** альтернативный маршрут должен быть максимально коротким, исключая все недоступные ППМ или установленные ЗОП. Данный подход применяется на стратегическом или предтактическом этапе планирования ИВП, когда затронутые зоны точно определены, а основной целью является обеспечение максимально удобного и эффективного полёта к пункту назначения;

- **сценарий 2:** альтернативный маршрут должен строго следовать траектории предпочтительного маршрута, отклоняясь только для обхода недоступных ППМ или обозначенных ЗОП. Этот сценарий используется на предтактическом или тактическом этапе планирования ИВП, когда ВС должно соблюдать утверждённый план полёта и требования УВД, и избегать ПКС с другими ВС. Этот сценарий также может быть применен во время полёта ВС, когда необходимо избежать недоступных ППМ или ЗОП, а затем вернуться на основной маршрут в ближайшем возможном ППМ.

- **сценарий 3:** альтернативные маршруты могут предоставлять гибкий подход, позволяющий использовать промежуточные ППМ, уже входящие в основной маршрут, для выхода или возвращения на него. Такой подход обеспечивает гибкость на тактическом этапе планирования ИВП, учитывая, что изменение одного маршрута ОВД может повлиять на другие маршруты ОВД. Кроме того, в зависимости от эксплуатационных ограничений или районов с высокой интенсивностью ВД, контролируемых службой УВД, ВС может быть перенаправлено на промежуточный ППМ по необходимости.

Этапы разработки оптимизационных и математических моделей

После определения ситуаций и сценариев модели следующим этапом является построение математической модели с соответствующими целевыми функциями и дополнительными ограничениями. Для этого продолжается использование структуры ВП, представленной в виде графа $G = (N, F)$ (как было рассмотрено в разделе 2.1). Каждый альтернативный маршрут ОВД a , заменяющий исходный основной маршрут ОВД m , формируется на основе подграфа $G^a = (N^a, F^a)$, который включает узлы и дуги, принадлежащие данному маршруту. При этом выполняется условие: $N^a \subset N$ и $F^a \subset F$.

Ниже перечислены некоторые специальные переменные, связанные с основным маршрутом ОВД m :

- T_t^m : множество всех ППМ на маршруте ОВД m , расположенных в позициях t , которые являются недоступными;
- Q_q^m : Площадь q ЗОП в форме многоугольника внутри структуры ВП $G^m = (N^m, F^m)$, через которую проходит одно или несколько рёбер маршрута ОВД m ;
- R_r^m : круговая ЗОП с радиусом r внутри структуры ВП $G^m = (N^m, F^m)$, через которую проходит одно или несколько рёбер маршрута ОВД m .

Целью модели является определение альтернативного маршрута с наименьшей возможной протяжённостью. Поэтому для описания данной оптимизационной задачи будет использовано уравнение, аналогичное уравнению (2.5). При этом все

обозначения сохраняют свои первоначальные значения, за исключением того, что вместо основного маршрута m рассматривается альтернативный маршрут a .

$$D_a = \sum_{N=N_0^a}^{N_{last}^a-1} d_{N,N+1}^a \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

Помимо вышеупомянутой целевой функции, необходимо разработать ограничение, учитывающее условия проектирования при ремаршрутизации маршрутов ОВД в соответствии с заданными требованиями. В частности, если маршрут ОВД m содержит ППМ, которые не могут быть использованы (ситуация 1), либо если маршрут ОВД пересекает ЗОП, заданную в виде круга радиуса r (R_r^m) или многоугольника Q_q^m (ситуация 2), требуется его модификация. При этом альтернативный маршрут ОВД a должен обеспечивать обход недоступных ППМ (уравнение 3.2) или указанных ЗОП (уравнения 3.3 и 3.4), сохраняя заданные начальные ППМ. Если конечный ППМ остаётся доступным, его необходимо сохранить без изменений. В противном случае необходимо определить новый ППМ, обеспечивающий безопасное завершение маршрута. Ситуация, при которой конечный ППМ становится недоступным, отражает реальные сценарии эксплуатации, например, закрытие аэропорта прибытия из-за неблагоприятных погодных условий или других эксплуатационных факторов.

- ППМ недоступен:

$$\begin{cases} \forall P_i^a \notin T_t^m \\ O_{N,t}^a = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

где: P_N^a : ППМ находится в позиции N на маршруте a . Он может перемещаться от N_0^a до N_{last}^a ;

- ЗОП имеет круглую форму:

$$\sum \sqrt{(x_N - x_r)^2 + (y_N - y_r)^2} > R_r^m, \forall N \in N^a \quad (3.3)$$

где: (x_r, y_r) : представляет широту и долготу центра окружности радиуса r ;

- ЗОП имеет форму многоугольника:

$$\sum O_{N,j}^a \cap Q_q^m = 0, O(N, j) \in F^a \quad (3.4)$$

Для сценариев 2 и 3, помимо уже упомянутой целевой функции и ограничений, в каждом сценарии необходимо дополнительно учитывать специфическое дополнительное ограничение. Это необходимо для обеспечения того, чтобы найденный альтернативный маршрут соответствовал заданным требованиям. В частности, уравнение 3.5 будет применяться в сценарии 2, чтобы обеспечить минимальные изменения альтернативного маршрута по сравнению с основным, при этом гарантируя, что он не пересекает ни одну ЗОП, с которыми пересекался основной маршрут. Уравнение 3.6 будет использоваться в сценарии 3 для обеспечения гибкости выбора альтернативного маршрута, при этом пользователям предоставляется возможность повторно использовать ППМ основного маршрута m , за исключением тех ППМ, которые входят в список недоступных (включая ППМ, расположенные в ЗОП, если таковые имеются). Кроме того, если конечный ППМ окажется недоступным из-за расположения в ЗОП, необходимо также соблюдать уравнение 3.7.

$$\left\{ \begin{array}{l} O_{N,j}^a \cap (T_t^m \cup R_r^m \cup Q_q^m) = \emptyset \\ \min \sum_{(N,j) \in F} |O_{N,j}^a - O_{N,j}^m| \\ \exists h \in N^a, O_{N,h} \text{ является первой дугой, отклоняющейся от } m \text{ и не коллинеарной с } m \\ \exists l \in N^a, O_{l,j} \text{ является последней дугой перед возвращением к } m \text{ и не коллинеарной с } m \end{array} \right. \quad (3.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall P_N^a \in N^a, O_{N,j}^a \cap (T_t^m \cup R_r^m \cup Q_q^m) = \emptyset \\ \sum_x O_{x,N}^a = 1, \sum_v O_{j,v}^a = 1 \quad x \in N^m, v \in N^m \\ \exists h \in N^a, h < j, O_{N,h}^a \text{ — отрезок, не коллинеарной с } m \\ \exists l \in N^a, \text{ with } l > i, O_{l,j}^a \text{ — отрезок, не коллинеарной с } m \end{array} \right. \quad (3.6)$$

где: $O_{N,j}^a = \{O(N, k_1), O(k_1, k_2), \dots, O(k_n, j)\}$. k_1, k_2, \dots, k_n могут существовать или не существовать. Это зависит от структуры и размеров ЗОП.

В уравнениях (3.5) и (3.6) индекс i обозначает последний доступный ППМ перед всеми недоступными ППМ (из-за их недостижимости или установленного

ЗОП), а индекс j – первый доступный ППМ после всех недоступных ППМ на маршруте m .

$$\begin{cases} N_{last}^a \neq N_{last}^m \\ \exists O_{k, N_{last}^a}^a = 1, k \in N^a \end{cases} \quad (3.7)$$

Уравнения 2.12–2.17 продолжают использоваться в модели для определения каждого маршрута ОВД a .

Следующим этапом является формирование входных данных, при этом для данной модели необходимо задать три ключевых набора входных данных. Во-первых, требуется информация о ППМ (их наименования, географические координаты – широта и долгота) и их взаимосвязях. Для обеспечения целостности и согласованности с моделью оптимизации сети маршрутов ОВД, данная модель также использует метод, представленный в разделе 2.2, для формирования соответствующих входных данных. Во-вторых, необходимо задать список маршрутов, который фактически представляет собой выходные данные оптимизированной сети маршрутов ОВД, выбранной в главе 2. Таблица 3.1 представляет часть данных входного файла, содержащего информацию о сети маршрутов ОВД. Третьим важным набором входных данных являются координаты ЗОП или список недоступных ППМ. Для обеспечения адаптивности модели в реальных условиях эти данные вводятся при каждом запуске программы. В частности, если ЗОП представляет собой многоугольник, вводится список координат (широта, долгота) его точек; если ЗОП имеет форму круга, задаются координаты центра и радиус; в случае необходимости исключения определённых ППМ вводятся их наименования.

Таблица 3.1. Часть входного файла, содержащего информацию о маршрутах.

Start	End	Route	Distance (km)
TSH	DAN	TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	612.1691419
CRA	PQU	CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	602.2431293
TSH	ARESI	TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	930.1607922
TSH	IGARI	TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	548.0796581
TSH	BUNTA	TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA	732.0188951

3.3. Блок-схема алгоритма с применением алгоритма A-star для ремаршрутизации маршрутов ОВД в трёх сценариях

Рисунок 3.1 иллюстрирует блок-схему алгоритма для сценария 1, при котором альтернативный маршрут определяется таким образом, чтобы его протяжённость была минимальной, применимо как к ситуации 1, так и к ситуации 2.

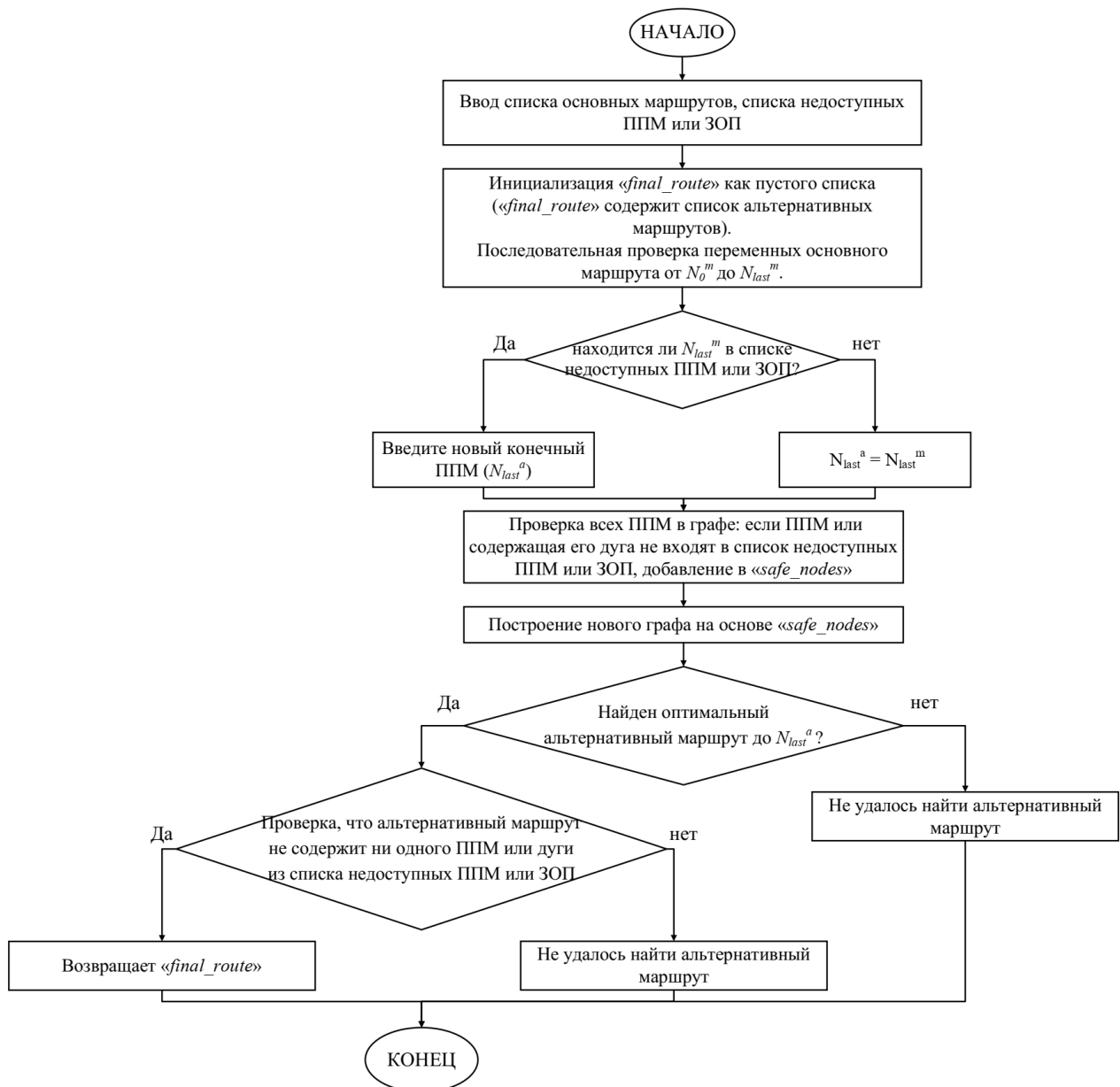


Рисунок 3.1. Схема алгоритма сценария 1

Рисунок 3.2 представляет блок-схему алгоритма для сценария 2, в котором альтернативный маршрут должен избегать недоступных ППМ или ЗОП, но при этом максимально сохранять сходство с основным маршрутом для сценариев 1 и 2.

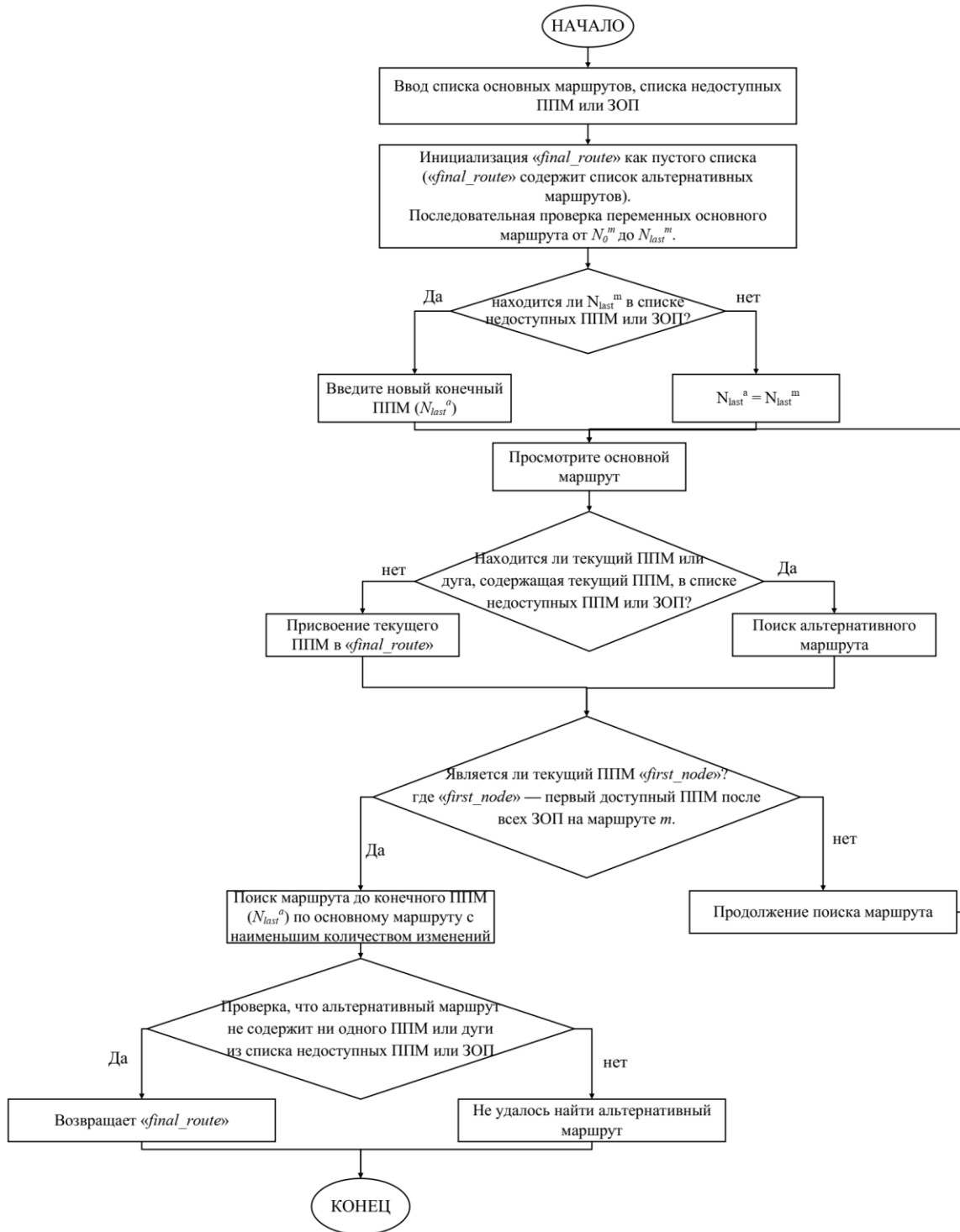


Рисунок 3.2. Схема алгоритма сценария 2

Сценарий 3 является более сложным с точки зрения оптимизации маршрута, поскольку в нем задействовано множество возможных случаев развития событий. Основная сложность заключается в том, что данный сценарий предоставляет пользователю гибкость в выборе промежуточных ППМ на основном маршруте, которые либо не входят в список недоступных, либо расположены в ЗОП. Кроме того, при этом альтернативный маршрут может либо потребовать назначения нового конечного ППМ, либо сохранит прежний конечный ППМ, в зависимости от расположения ЗОП и ППМ, которые были заблокированы.

Таким образом, в сценарии 3 будут рассмотрены различные случаи в каждой ситуации. В частности, для ситуации 1, когда только ППМ становятся недоступными, анализируются два случая:

- случай 1: если конечный ППМ на основном маршруте остается доступным, можно выбрать один ППМ из списка ППМ перед первым недоступным ППМ в качестве ППМ выхода с основного маршрута, а также один ППМ из списка ППМ после последнего недоступного ППМ в качестве ППМ возврата на основной маршрут;

- случай 2: если конечный ППМ на основном маршруте недоступен, выбирается новый конечный ППМ. Когда на основном маршруте недоступным оказывается только конечный ППМ, можно выбрать любой ППМ на основном маршруте в качестве ППМ разветвления для перехода к новому конечному ППМ, при этом предыдущая часть маршрута от начального ППМ до выбранного сохраняется неизменной. Если на основном маршруте недоступны более одного ППМ, возможно выбрать два ППМ по аналогии с первым случаем.

В ситуации 2, когда ЗОП создают недоступные участки на основном маршруте и требуют ремаршрутизации, рассматриваются три возможных случая:

- случай 1: появление ЗОП оказывает влияние на основной маршрут, но не затрагивает конечный ППМ. В данном случае возможен выбор одного из ППМ из списка ППМ, расположенных перед первым ППМ, заблокированным ЗОП, в

качестве ППМ выхода с основного маршрута. Затем из списка ППМ, находящихся после последнего ППМ, заблокированного ЗОП, выбирается другой ППМ для возвращения на основной маршрут и продолжения движения к конечному ППМ;

- случай 2: появление ЗОП оказывает влияние на основной маршрут и делает невозможным использование конечного ППМ. В этом случае необходимо выбрать новый конечный ППМ. Затем из списка безопасных ППМ (т.е. находящихся вне ЗОП) выбирается подходящий ППМ. От этого ППМ строится альтернативный маршрут, который отклоняется от основного маршрута и формирует кратчайший путь к новому конечному ППМ. Следует отметить, что в данном случае участок альтернативного маршрута от начального ППМ до выбранного ППМ должен максимально соответствовать основному маршруту и избегать все ЗОП, оказывающих влияние на основной маршрут;

- случай 3: появление ЗОП оказывает влияние на основной маршрут, делая невозможным использование конечного ППМ, при этом основной маршрут затрагивается более чем одной ЗОП. В этом случае необходимо выбрать новый конечный ППМ. Затем из списка безопасных ППМ (то есть расположенных вне ЗОП) подбирается наиболее подходящий ППМ. Далее рассчитывается альтернативный маршрут, который начинается от начального ППМ, избегает все ЗОП и возвращается на основной маршрут только в выбранном ППМ. После этого альтернативный маршрут продолжается вдоль основного маршрута до последнего доступного на нём ППМ, от которого затем прокладывается кратчайший путь к новому конечному ППМ.

Все перечисленные аспекты делают сценарий 3 самым сложным с точки зрения ремаршрутизации, поскольку он охватывает широкий спектр возможных случаев, требующих не только оптимизированного набора инструментов, но и тщательно продуманной структуры модели для эффективного управления процессом. Рисунки от 3.3 до 3.7 показывают блок-схемы алгоритмов для сценария 3: 3.3 и 3.4 относятся к случаям 1 и 2 ситуации 1, а 3.5 – 3.7 охватывают три случая ситуации 2.

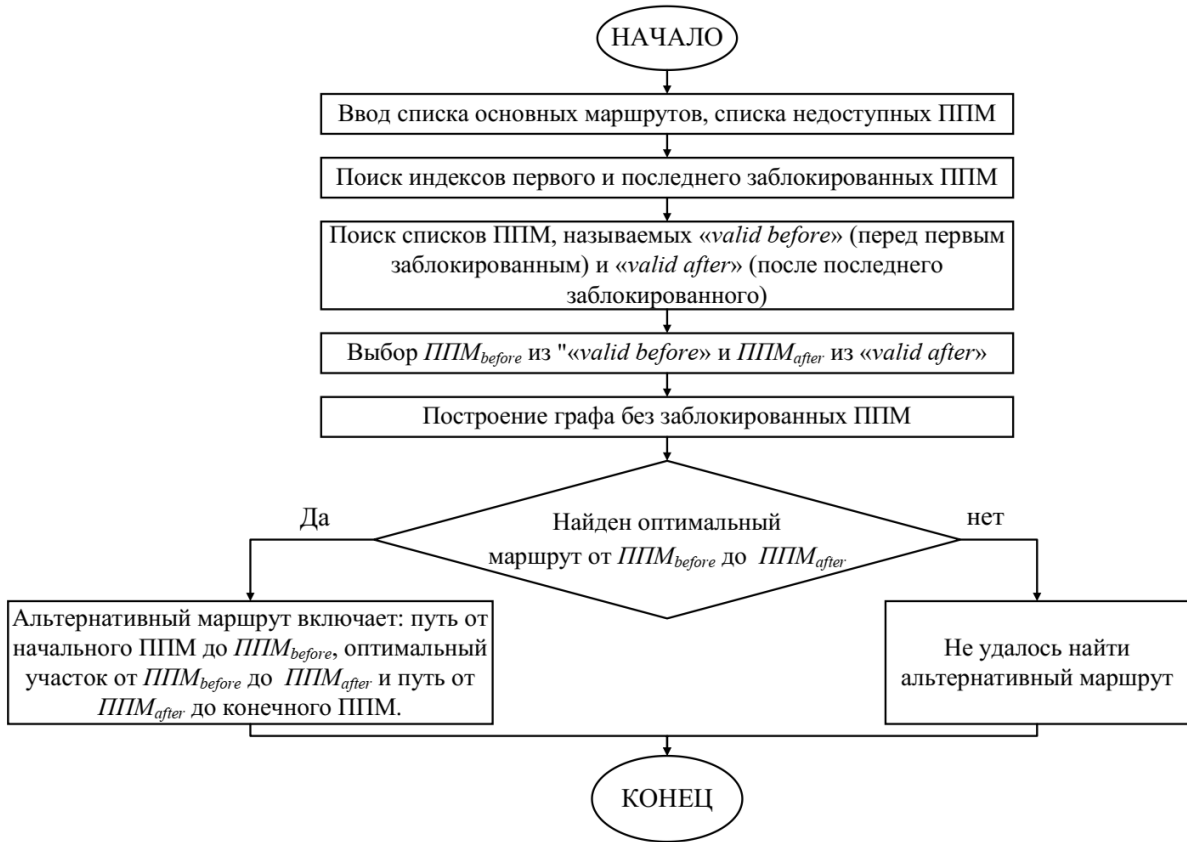


Рисунок 3.3. Блок-схема алгоритма случая 1, ситуации 1, сценария 3

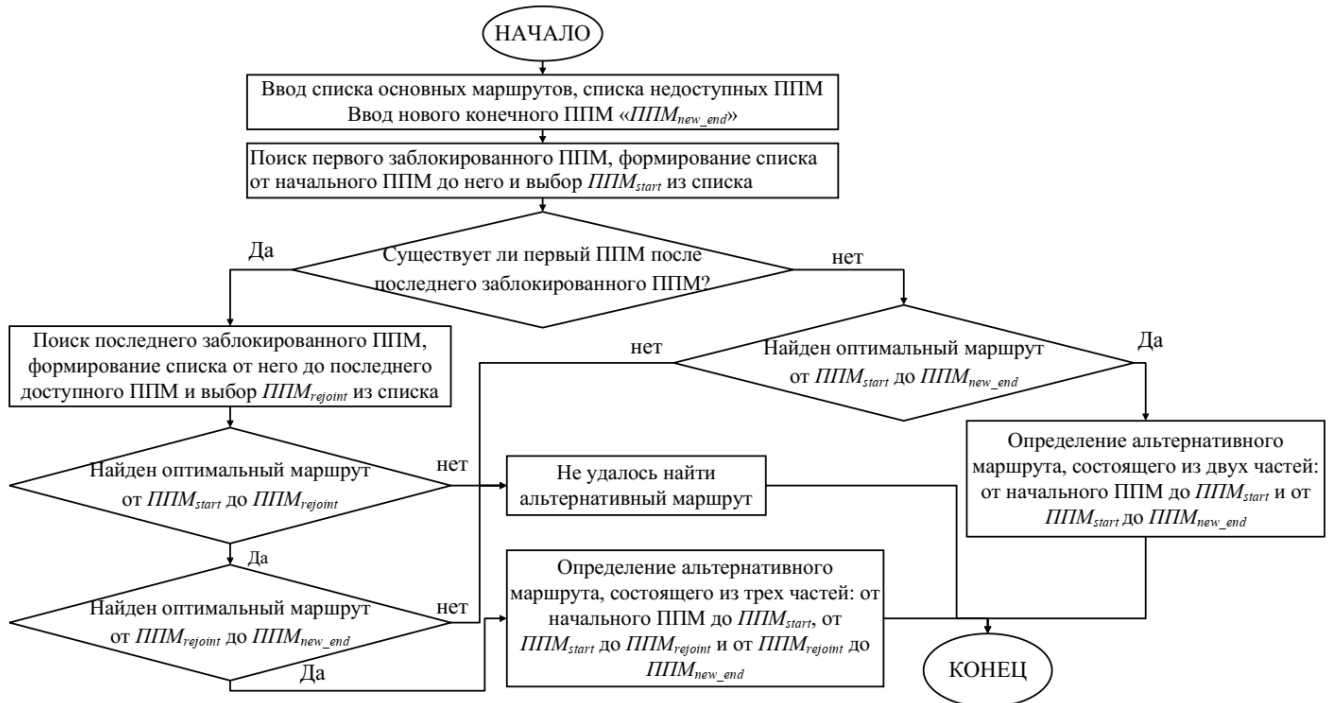


Рисунок 3.4. Блок-схема алгоритма случая 2, ситуации 1, сценария 3

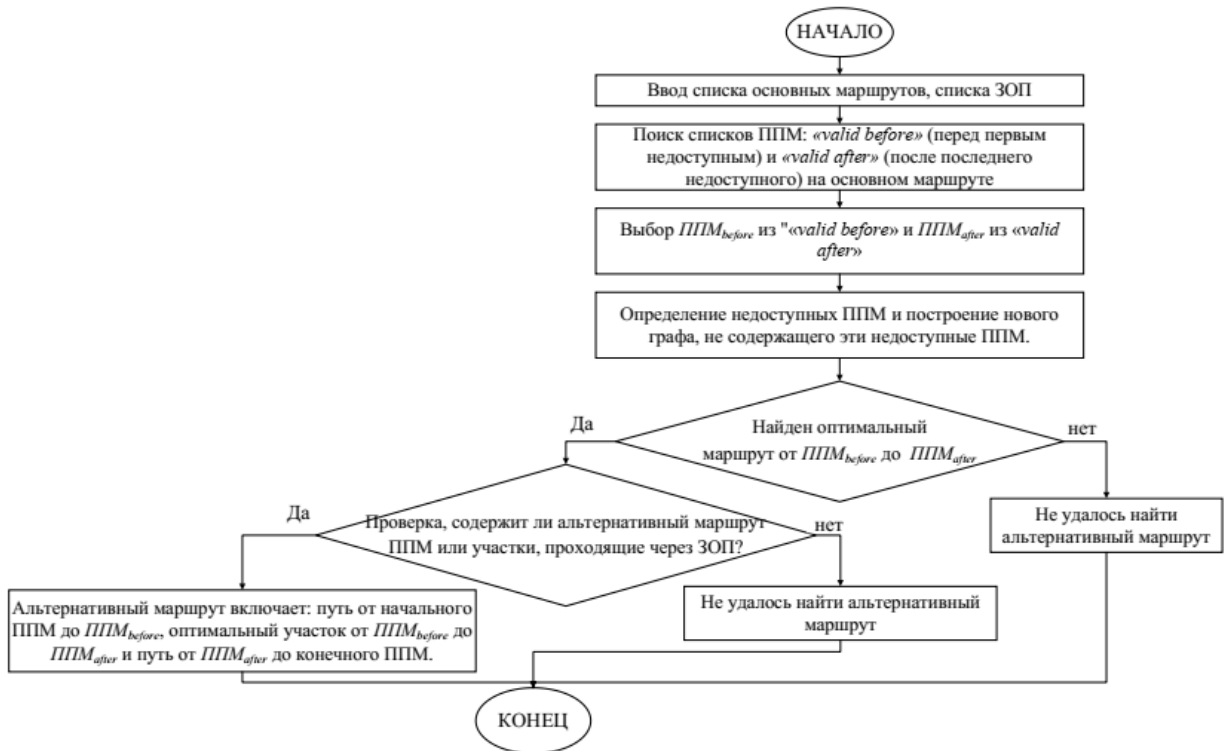


Рисунок 3.5. Блок-схема алгоритма случая 1, ситуации 2, сценария 3

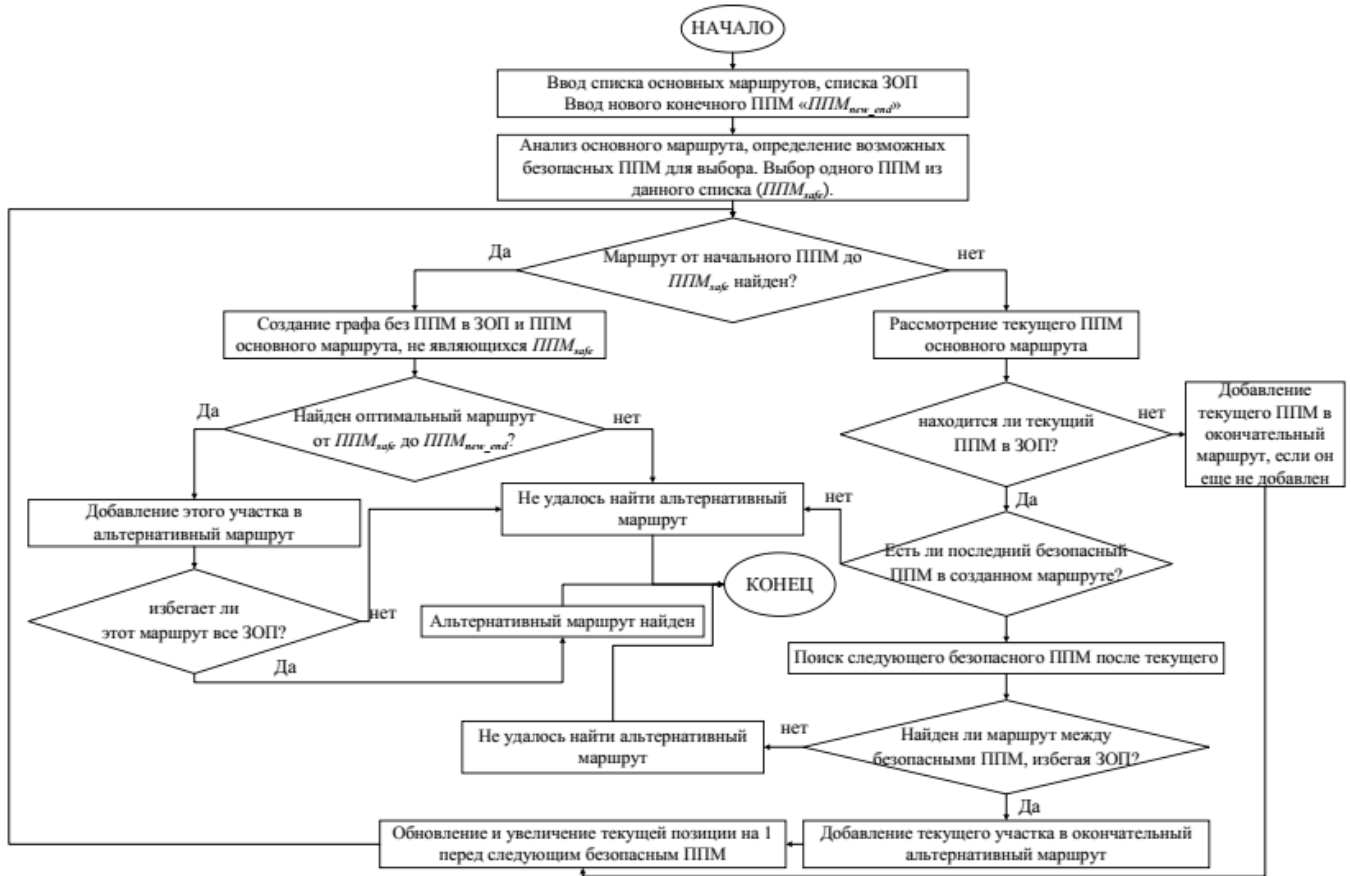


Рисунок 3.6. Блок-схема алгоритма случая 2, ситуации 2, сценария 3

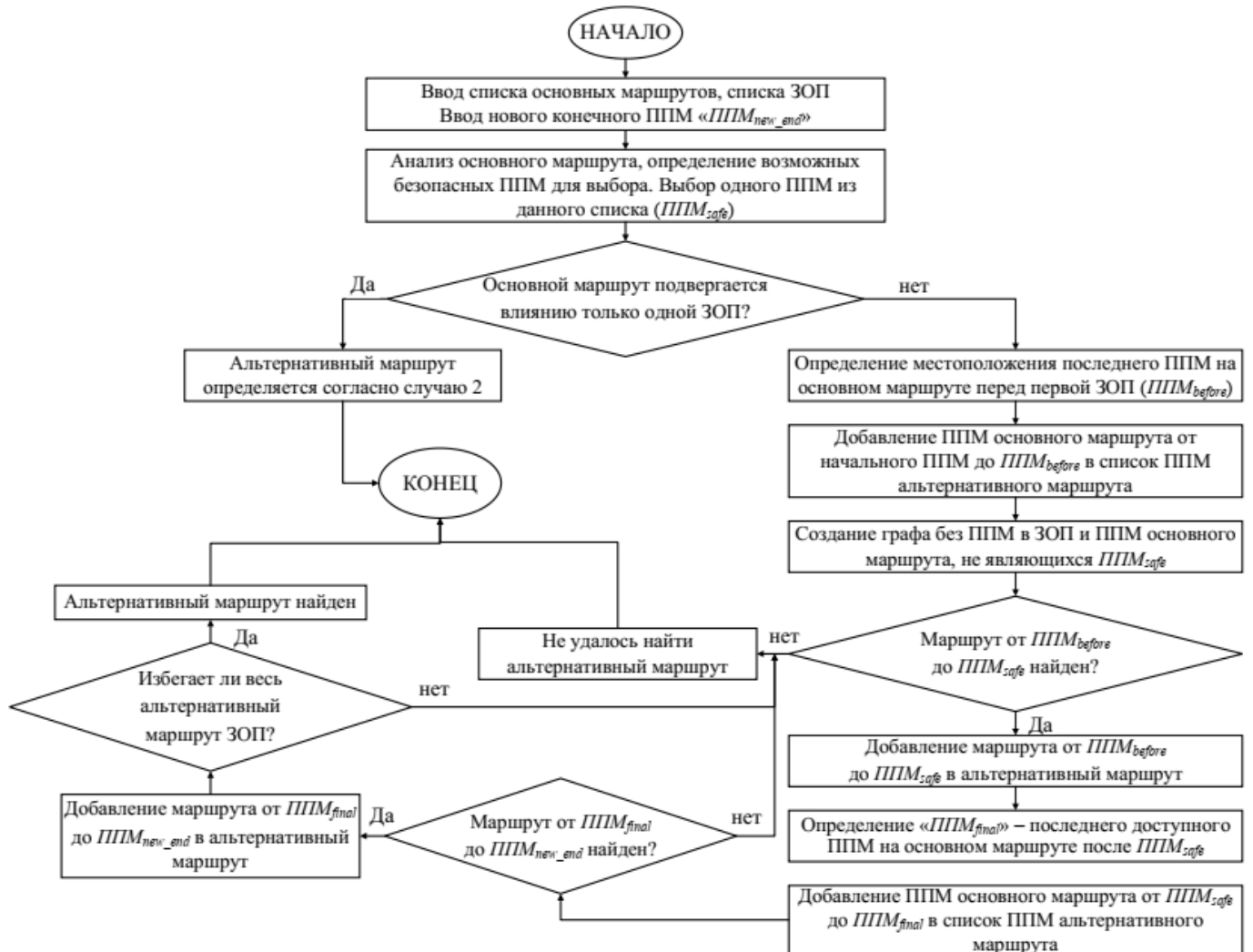


Рисунок 3.7. Блок-схема алгоритма случая 3, ситуации 2, сценария 3

3.4. Результаты модели ремаршрутизации ОВД и анализ результатов

Для проверки эффективности модели ремаршрутизации маршрутов ОВД в соответствии с предложенными сценариями крайне важно определить ППМ или ЗОП, которые могут оказаться перегруженными или недоступными вследствие различных факторов, таких как неблагоприятные погодные условия, военные учения, отказ оборудования и другие ограничения. На основе реальной оперативной

обстановки ВП РДЦ Хошима были выбраны определённые ППМ и ЗОП, которые предлагались для моделирования и анализа результатов. Данный подход позволяет не только проверить работоспособность предложенной модели, но и адаптировать ее к реальным условиям эксплуатации.

Для практической применимости модели критически важно обеспечить ее способность к оперативному и гибкому реагированию на изменения, касающиеся местоположения указанных зон. Это достигается путем модификации входных параметров модели, что позволяет оперативно учитывать новые обстоятельства и обновлять конфигурацию маршрутов. Гибкость модели достигается за счет динамической настройки географических координат, таких как широта и долгота, которые определяют границы ЗОП или местоположение ППМ. В частности, используются методы, позволяющие изменять конфигурацию многогранников или круговых областей, представляющих ЗОП, что способствует более точной адаптации к текущим условиям УВД. Такой подход гарантирует максимальную эффективность модели при изменяющихся внешних условиях и повышает ее применимость в реальных операционных сценариях.

Анализ результатов ситуации 1

В ситуации 1 предполагается, что ППМ, включая PQU, DADEN, AGSIS и PCA, становятся недоступными. Это требует применения процедуры ремаршрутизации, позволяющей обойти недоступные точки и обеспечить безопасное и эффективное выполнение полётов. На рисунке 3.8 представлен анализ, выполненный с использованием модели, показывающий влияние недоступности ППМ на основные маршруты в сети маршрутов ОВД в ВП РДЦ Хошима. На основе полученных результатов можно сделать выводы: в общей сложности 7 маршрутов ОВД оказались затронуты недоступностью четырёх ППМ. Два маршрута скорректированы на конечных ППМ (список 1), два – на начальных ППМ (список 2), и три – на промежуточных ППМ (список 3). Особо следует отметить маршрут DAN – PQU, оказавшимся под двойным воздействием из-за недоступности сразу двух ППМ –

PQU и DADEN, что значительно усложняет процесс планирования альтернативных решений.

Список 1. Маршруты с затронутыми конечными ППМ:

1. Маршрут из CRA в PQU

Основной маршрут: CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU

Затронутые ППМ: PQU

2. Маршрут из DAN в PQU

Основной маршрут: DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU

Затронутые ППМ: PQU, DADEN

Список 2. Маршруты с затронутыми начальными ППМ:

3. Маршрут из PCA в TRN

Основной маршрут: PCA - NOBID - PATMA - DONXO - RUNOP - MOHEB - TRN

Затронутые ППМ: PCA

4. Маршрут из PQU в IGARI

Основной маршрут: PQU - ADBOP - IGARI

Затронутые ППМ: PQU

Список 3. Маршруты с затронутыми промежуточными ППМ:

5. Маршрут из CRA в DAN

Основной маршрут: CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - DAN

Затронутые ППМ: PCA

6. Маршрут из TSH в DAN

Основной маршрут: TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN

Затронутые ППМ: DADEN

7. Маршрут из TSH в PANDI

Основной маршрут: TSH - BUKMA - MATGI - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI

Затронутые ППМ: AGSIS

Рисунок 3.8. Результаты анализа маршрутов ОБД были затронуты из-за недоступности четырёх ППМ: PQU, DADEN, AGSIS и PCA

В практическом применении предложенная модель обладает способностью одновременно определять альтернативные маршруты для всех основных маршрутов, конечные и промежуточные ППМ которых оказались под воздействием ЗОП. Однако, для улучшения наглядности отображаемых результатов, облегчения наблюдения за изменениями и повышения интерпретируемости полученных данных, были выбраны только четыре маршрута ОБД: CRA – PQU, DAN – PQU, TSH – DAN и TSH – PANDI для ремаршрутизации. Эти маршруты будут рассмотрены в контексте поиска альтернативных маршрутов в соответствии с предложенными сценариями. Для двух маршрутов, конечный ППМ которых подвергся воздействию ЗОП, необходимо выбрать новый конечный ППМ. В соответствии с фактическими условиями эксплуатации, если аэропорт Фукуок вынужден закрыться и не может принимать ВС, в качестве запасного аэропорта может быть использован аэропорт Кантхо. Таким

образом, в данной модели аэропорт Кантхо (TRN) будет выбран в качестве нового конечного ППМ маршрута. На рисунке 3.9 представлена интерфейсная схема, позволяющая вводить новый конечный ППМ для рассматриваемых маршрутов.

Обработка маршрута от DAN до PQU
 Исходный конечный ППМ заблокирован. Пожалуйста, введите новый конечный ППМ:
 Новый конечный ППМ: **TRN**
 Обработка маршрута от DAN до PQU
 Исходный конечный ППМ заблокирован. Пожалуйста, введите новый конечный ППМ:
 Новый конечный ППМ: **TRN**

Рисунок 3.9. Интерфейс ввода нового конечного ППМ для затронутого маршрута

На рисунках 3.10 и 3.11 показаны результаты альтернативных маршрутов для сценариев 1 и 2, красными кружками обозначены недоступные ППМ.

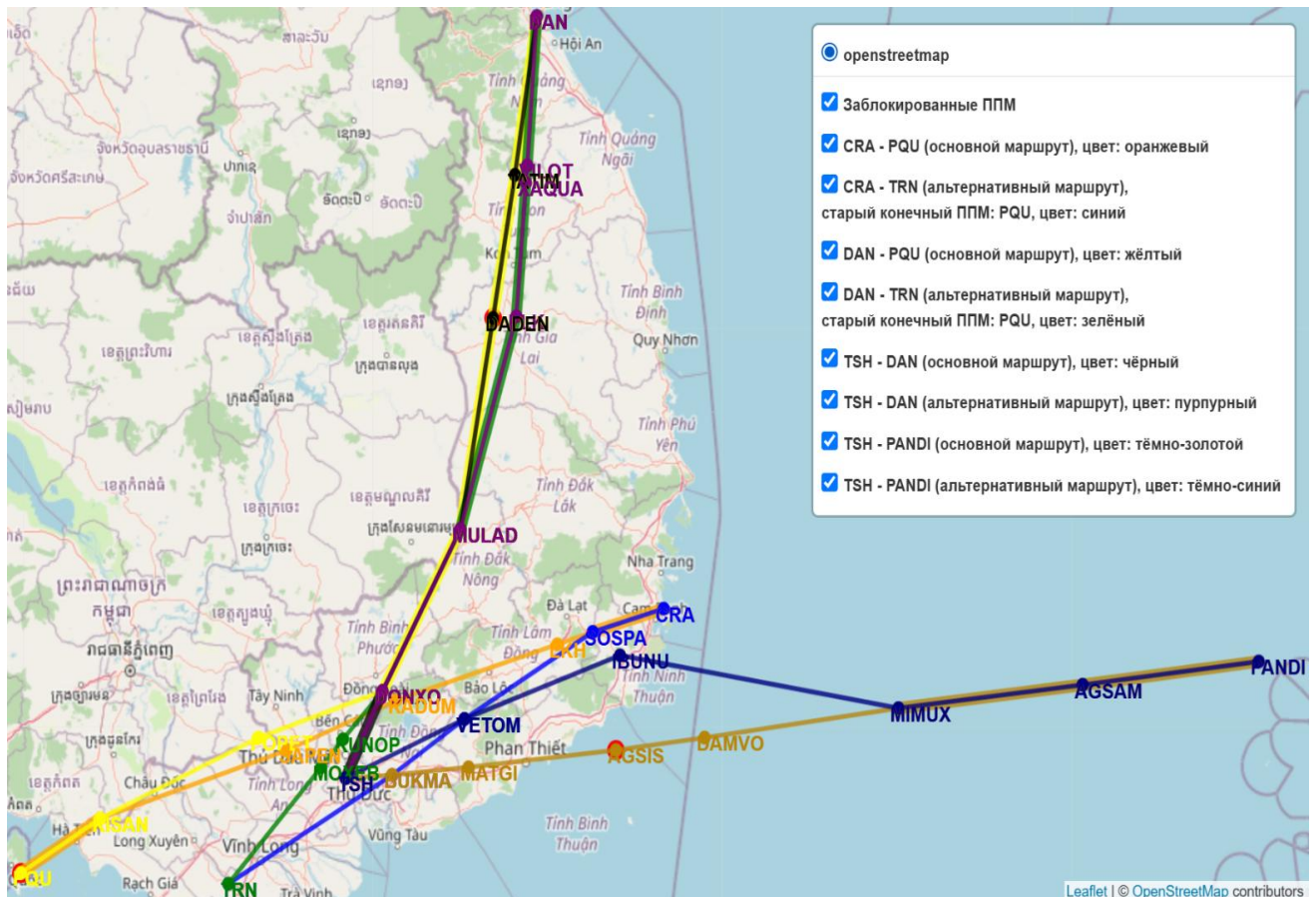


Рисунок 3.10. Результат сценария 1 ситуации 1

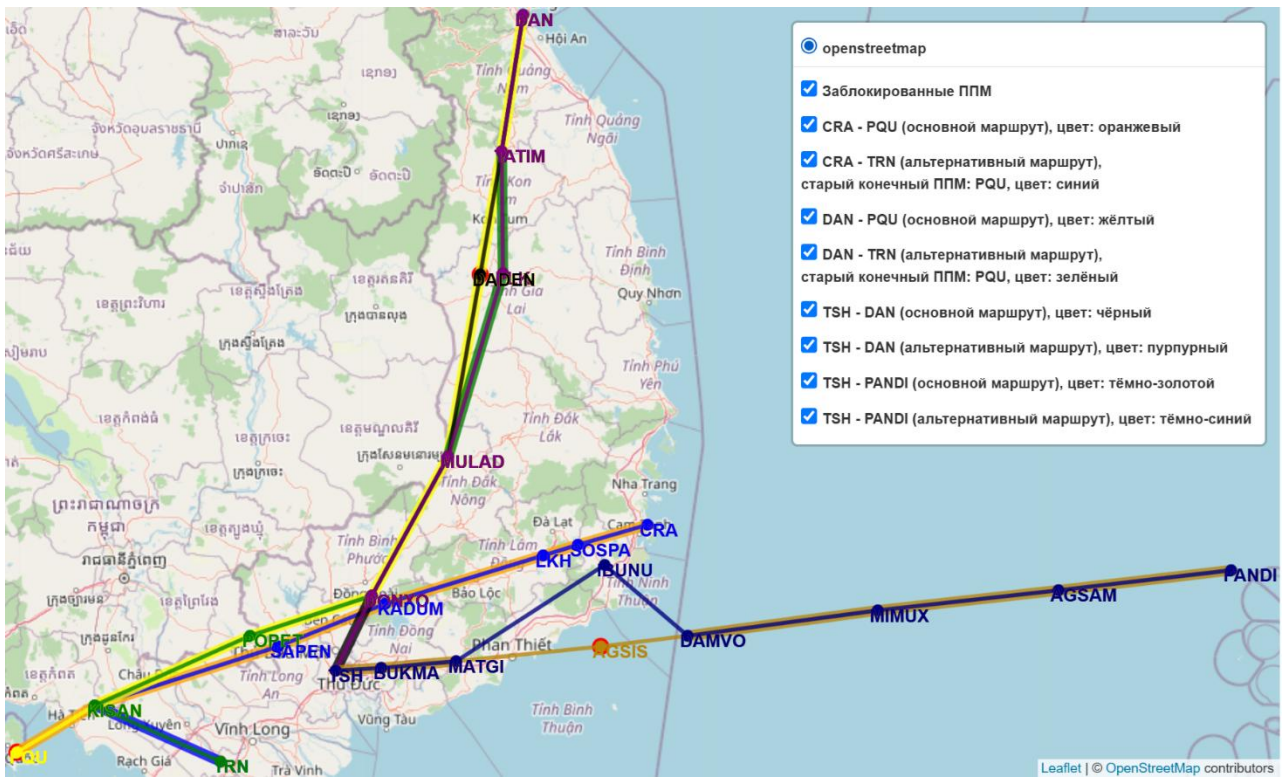


Рисунок 3.11. Результат сценария 2 ситуации 1

В сценарии 3, в зависимости от требований диспетчера и текущей воздушной обстановки, выбирается ППМ выхода или возврата на маршрут из списка предлагаемых ППМ. Результаты анализа модели с возможными ППМ для каждого маршрута показаны на рисунке 3.12. Для маршрутов TSH – DAN и TSH – PANDI, на которых может стать недоступным только промежуточный ППМ (случай 1), требуется выбрать по два ППМ. Для TSH – DAN это ППМ выхода TSH и ППМ возврата TATIM, а для TSH – PANDI – ППМ выхода BUKMA и ППМ возврата AGSAM. Для маршрутов CRA – PQU и DAN – PQU требуется использовать новый конечный ППМ TRN, что соответствует случаю 2; для CRA – PQU, где недоступен лишь один конечный ППМ, необходимо выбрать ППМ для выхода с основного маршрута, а для DAN – PQU, где помимо конечного ППМ недоступен и промежуточный, требуется два ППМ: DAN как выходной и DONXO как возвратный, после которого линия пути продолжается по основному маршруту до последнего доступного ППМ, затем перенаправляется к новому конечному ППМ.

Обработка маршрута от CRA до PQU
 ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:
 1. CRA
 2. SOSPA
 3. LKH
 4. KADUM
 5. SAPEN
 6. KISAN
 Выберите индекс ППМ выхода: 3

Обработка маршрута от TSH до DAN
 ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:
 1. TSH
 2. DONXO
 3. MULAD
 Выберите индекс ППМ выхода: 1

ППМ возврата на основной маршрут, доступные для выбора:
 1. TATIM
 2. DAN
 Выберите индекс ППМ возврата: 1

Обработка маршрута от DAN до PQU
 ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:
 1. DAN
 2. TATIM
 Выберите индекс ППМ выхода: 1

ППМ возврата на основной маршрут, доступные для выбора:
 1. DAN
 2. TATIM
 3. MULAD
 4. DONXO
 5. POPET
 6. KISAN
 Выберите индекс ППМ возврата: 4

Обработка маршрута от TSH до PANDI
 ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:
 1. TSH
 2. BUKMA
 3. MATGI
 Выберите индекс ППМ выхода: 2

ППМ возврата на основной маршрут, доступные для выбора:
 1. DAMVO
 2. MIMUX
 3. AGSAM
 4. PANDI
 Выберите индекс ППМ возврата: 3

Рисунок 3.12. Список возможных ППМ для поиска альтернативного маршрута для четырёх маршрутов

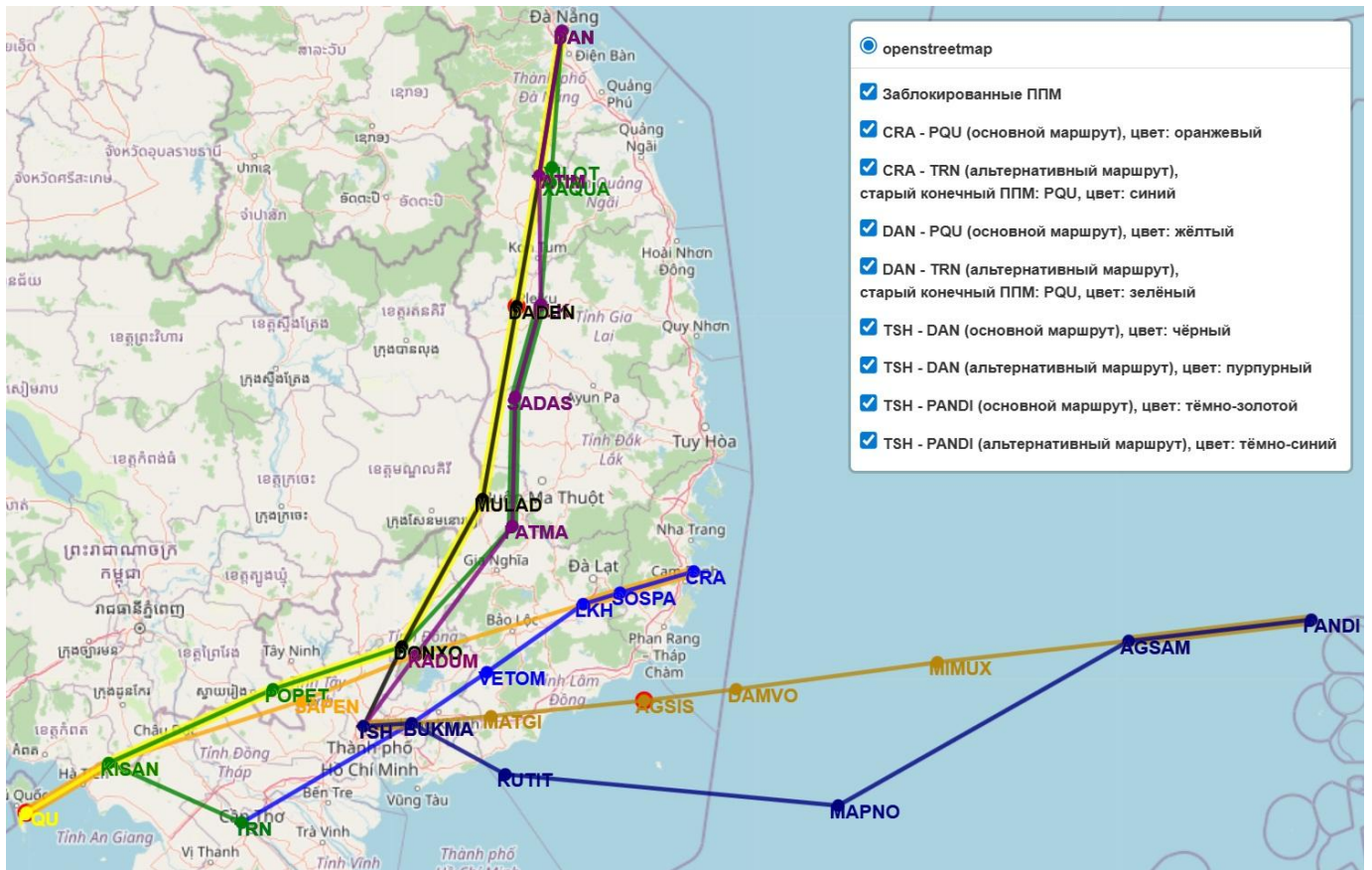


Рисунок 3.13. Результат сценария 3 ситуации 1

Рисунок 3.13 показывает результаты сценария 3 для четырёх маршрутов: TSH – DAN и TSH – PANDI (случай 1), CRA – PQU и DAN – PQU (случай 2).

Таблицы 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5 представляют результаты анализа маршрутов в соответствии с перечнем ППМ, а также их протяжённость.

Таблица 3.2. Альтернативного маршрута TSH - DAN в ситуации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	614,3 км TSH - DONXO - MULAD - PLK - XAQUA - VILOT - DAN	615,1 км TSH - DONXO - MULAD - PLK - TATIM - DAN	628 км TSH - KADUM - PATMA - SADAS - PLK - TATIM - DAN

Таблица 3.3. Альтернативного маршрута TSH - PANDI в ситуации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
806,3 км TSH - BUKMA - MATGI - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI	824 км TSH - VETOM - IBUNU - MIMUX - AGSAM - PANDI	852,8 км TSH - BUKMA - MATGI - IBUNU - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI	852,6 км TSH - BUKMA - RUTIT - MAPNO - AGSAM - PANDI

Таблица 3.4. Альтернативный маршрут CRA - PQU в ситуации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 2
602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	440,3 км CRA - SOSPA - VETOM - BUKMA - TRN	644,8 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - TRN	441,6 км CRA - SOSPA - LKH - VETOM - BUKMA - TRN

Таблица 3.5. Альтернативного маршрута DAN - PQU в ситуации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 2
885,7 км DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU	741,2 км DAN - VILOT - XAQUA - PLK - MULAD - DONXO - RUNOP - MOXEB - TRN	931,2 км DAN - TATIM - PLK - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - TRN	945,4 км DAN - VILOT - XAQUA - PLK - SADAS - PATMA - DONXO - POPET - KISAN - TRN

На основе полученных результатов, очевидно, что модель функционирует с высокой точностью при определении альтернативных маршрутов, соответствующих заданным целевым функциям и ограничениям в различных сценариях. Анализ представленных четырех маршрутов показывает, что независимо от условий, сценарий 1 неизменно обеспечивает наикратчайший альтернативный маршрут. В сценарии 2 альтернативный маршрут остается максимально приближенным к первоначальному предпочтительному маршруту и отклоняется от него только в тех случаях, когда определенные ППМ становятся недоступными. Это свидетельствует о высокой адаптивности модели в условиях, когда реальные эксплуатационные ограничения допускают лишь частичное изменение маршрута, при этом требуя строгого соблюдения исходной траектории основного маршрута. Что касается сценария 3, альтернативный маршрут определяется с точным соблюдением заданных ППМ выхода и ППМ возврата на основной маршрут, обеспечивая строгое соответствие предпочтениям, установленным пользователем. В случае если ППМ оказывает влияние на конечный ППМ основного маршрута, альтернативный маршрут определяется с высокой точностью до вновь заданного ППМ, который может быть легко адаптирован в соответствии с потребностями пользователя.

Можно отметить, что в случаях, когда недоступными ППМ являются только промежуточные ППМ, протяжённость найденных альтернативных маршрутов всегда

превышает протяженность основного маршрута. Это подтверждает надежность, эффективность и точность модели оптимизации сети маршрутов ОВД, которая стабильно находит оптимальные решения с минимальной общей протяженностью. Однако если требуется изменение конечного ППМ основного маршрута, возможно, что найденный альтернативный маршрут окажется короче (например, маршрут CRA – RQU). Это легко объясняется тем, что заменяющий ППМ TRN расположен ближе к начальному ППМ CRA по сравнению с первоначальным конечным ППМ RQU, что позволяет ВС достичь пункта назначения быстрее.

Благодаря высокой гибкости сценария 3 и адаптивности в выборе нового ППМ, альтернативный маршрут может динамически определяться в соответствии с конкретными потребностями пользователя, не нарушая целостность процесса ремаршрутизации. Модель динамически корректирует маршрут, сохраняя вычислительную эффективность и логическую согласованность, что делает её очень подходящей для практического применения.

Анализ результатов ситуации 2

Для ситуации 2, с целью оценки способности модели обнаруживать и управлять ЗОП, были рассмотрены два конкретных типа конфигураций: первая представляет собой два четко разделенных ЗОП, а вторая – конфигурацию, в которой ЗОП частично накладываются друг на друга. Выбор именно этих двух конфигураций обусловлен практическими соображениями. В реальной ОрВП вероятность одновременного появления трёх или более ЗОП крайне низка, поскольку ограничения ВП структурируются и координируются соответствующими органами. Даже в редких случаях, когда может возникнуть такая конфигурация, вероятность того, что один и тот же маршрут ОВД одновременно окажется под воздействием всех трёх ЗОП, еще ниже. Таким образом, анализируемые конфигурации не только отражают реалистичные операционные условия, но и обеспечивают всестороннюю основу для оценки производительности модели, как в изолированных, так и в сложных, пересекающихся конфигурациях ЗОП. Такой подход позволяет

всесторонне проверить эффективность модели в выявлении и корректном реагировании на различные пространственные конфигурации ЗОП. В результате будет продемонстрирована практическая применимость модели в динамических условиях ОрВП, где ключевыми аспектами остаются точность идентификации и своевременная адаптация к изменениям для обеспечения БП и эффективности.

Для первой конфигурации, две ЗОП имеют форму многоугольников, заданных следующими координатами: (10,645; 103,476), (11,246; 104,178), (11,096; 105,128), (10,209; 105,333), (9,709; 104,833), (9,251; 103,783), (9,695; 102,988) и (15,581; 107,521), (15,179; 107,344), (14,533; 107,101), (14,283; 107,017), (14,257; 109,343), (14,263; 109,821), (15,571; 109,208). После интеграции данных двух указанных ЗОП был проведен аналитический обзор затронутых ими маршрутов ОВД, результаты которого представлены на рисунке 3.14.

Список 1: Маршруты с затронутыми конечными ППМ:

1. Маршрут от CRA до PQU
 Полный маршрут: CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU
 Затронутые ППМ: KISAN, PQU
 Затронутые участки: (SAPEN->KISAN), (KISAN->PQU)
2. Маршрут от DAN до PQU
 Полный маршрут: DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU
 Затронутые ППМ: TATIM, KISAN, PQU
 Затронутые участки: (DAN->TATIM), (TATIM->DADEN), (POPET->KISAN), (KISAN->PQU)

Список 2: Маршруты с затронутыми начальными ППМ:

3. Маршрут от PQU до IGARI
 Полный маршрут: PQU - ADBOP - IGARI
 Затронутые ППМ: PQU
 Затронутые участки: (PQU->ADBOP)
4. Маршрут от KISAN до IPRIX
 Полный маршрут: KISAN - TUNPO - BITOD - IPRIX
 Затронутые ППМ: KISAN, TUNPO
 Затронутые участки: (KISAN->TUNPO), (TUNPO->BITOD)

Список 3: Маршруты с затронутыми промежуточными ППМ/участками:

5. Маршрут от TSH до DAN
 Полный маршрут: TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN
 Затронутые ППМ: TATIM
 Затронутые участки: (DADEN->TATIM), (TATIM->DAN)
6. Маршрут от TSH до BUNTA
 Полный маршрут: TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA
 Затронутые ППМ: CQ
 Затронутые участки: (MUMGA->CQ), (CQ->BUNTA)
7. Маршрут от CRA до BUNTA
 Полный маршрут: CRA - KARAN - ASUKU - BUNTA
 Затронутые участки: (KARAN->ASUKU)
8. Маршрут от CRA до DAN
 Полный маршрут: CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - DAN
 Затронутые ППМ: KUMUN
9. Маршрут от HAMTA до TSH
 Полный маршрут: HAMTA - VISAO - NASEN - BMT - LEMAN - HESIN - THALY - ENRIN - TSH
 Затронутые ППМ: VISAO
 Затронутые участки: (HAMTA->VISAO), (VISAO->NASEN)

Рисунок 3.14. Результаты анализа маршрута ОВД в ситуации 2 конфигурации 1

Рисунок 3.14 показывает, что в общей сложности под влияние указанных ЗОП попали девять маршрутов ОВД. Из них два маршрута испытали влияние ЗОП в районе конечного пункта маршрута (список 1), два маршрута были затронуты в области начального пункта маршрута (список 2), а пять маршрутов подверглись воздействию на промежуточных ППМ (список 3). Среди затронутых маршрутов особое внимание следует уделить маршруту DAN – RQU, который оказался под воздействием двух ЗОП одновременно. Влияние данных зон распространилось на три ППМ – TATIM, KISAN и RQU, что привело к изменению четырех отдельных участков маршрута. В то же время остальные маршруты испытали влияние только одной ЗОП, что, соответственно, отразилось на меньшем числе участков.

Аналогично ситуации 1, несмотря на то, что можно выполнить ремаршрутизацию всего маршрута, в котором затронуты как конечный, так и промежуточный ППМ, для удобства графического отображения маршрутов, анализа и сравнения результатов были выбраны только четыре маршрута, а именно: CRA – RQU, DAN – RQU, TSH – BUNTA, CRA – DAN. При этом на маршрутах CRA – RQU и DAN – RQU конечный ППМ подвергается воздействию ЗОП, поэтому необходимо выбрать новый конечный ППМ в качестве замены. В реальных условиях в подобных ситуациях, как правило, выбирается ППМ TRN (аналогично ситуации 1). Однако чтобы продемонстрировать эффективность программы в обеспечении гибкости при выборе альтернативного конечного ППМ, в данной конфигурации в качестве замены будет использован ППМ CN. На рисунке 3.15 представлена схема выбора альтернативного конечного ППМ для двух маршрутов. Результаты сценариев 1 и 2 показаны на рисунках 3.16 и 3.17.

Исходный конечный ППМ заблокирован. Пожалуйста, введите новый конечный ППМ:
 Новый конечный ППМ: CN
 Исходный конечный ППМ заблокирован. Пожалуйста, введите новый конечный ППМ:
 Новый конечный ППМ: CN

Рисунок 3.15. Интерфейс для ввода нового конечного ППМ для данного маршрута

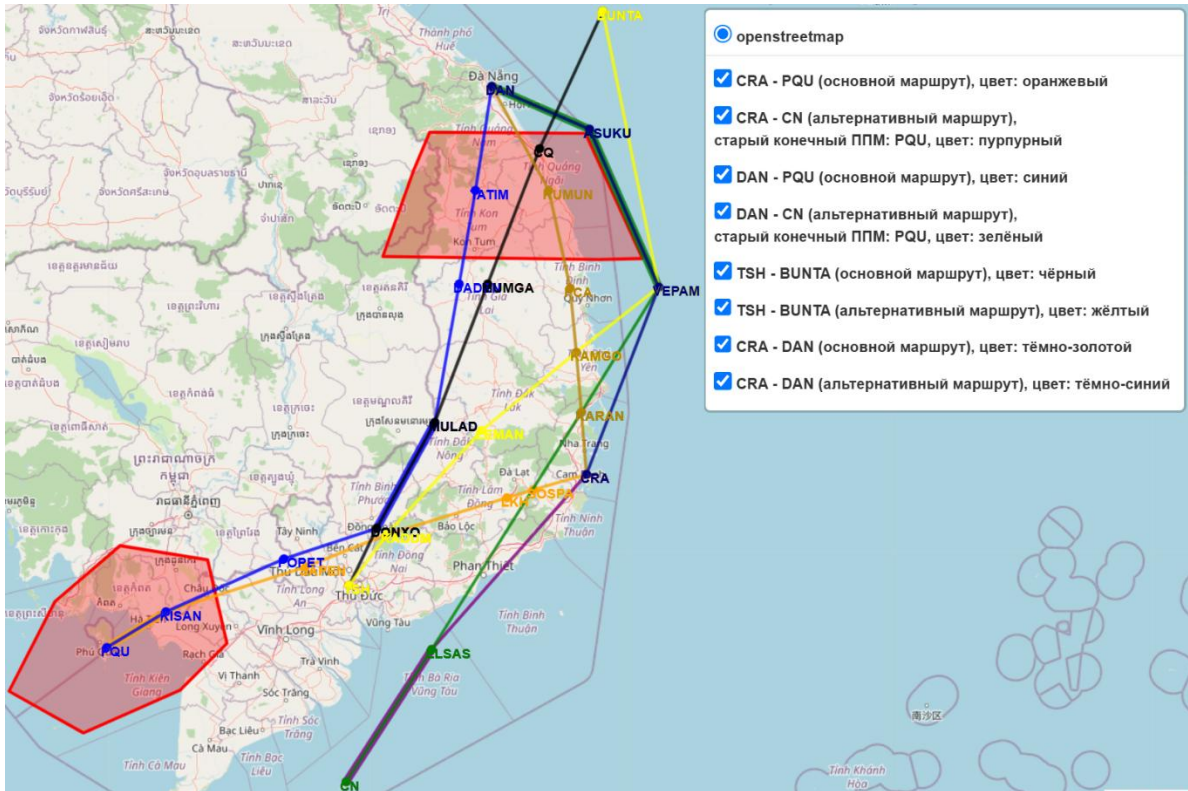


Рисунок 3.16. Результат сценария 1 ситуации 2 конфигурации 1

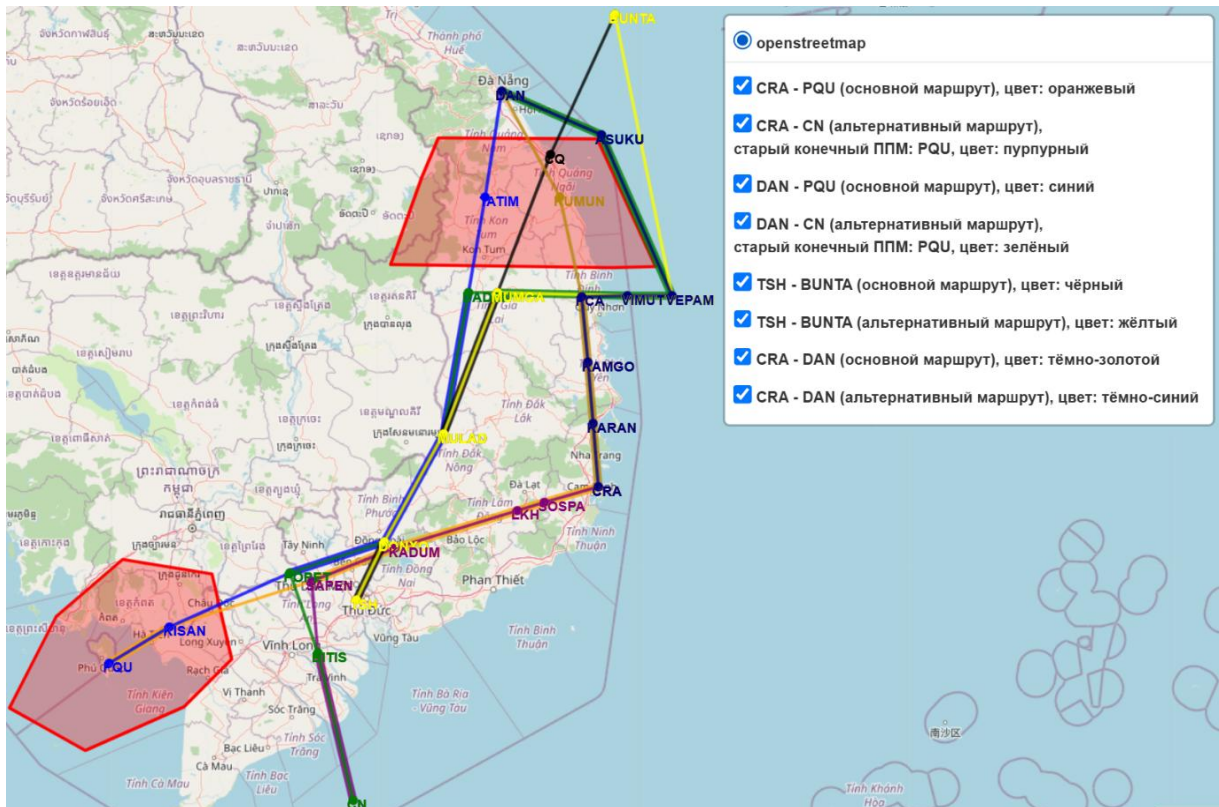


Рисунок 3.17. Результат сценария 2 ситуации 2 конфигурации 1

Для сценария 3, с целью обеспечения гибкости и адаптивности к реальным условиям эксплуатации, ППМ для выхода и возврата на основной маршрут выбираются в соответствии с интересами диспетчера. На рисунке 3.18 представлен список доступных ППМ, которые могут быть выбраны для маршрутов.

Обработка маршрута 1 от CRA до CN (изменен конечный ППМ)	Обработка маршрута 2 от DAN до CN (изменен конечный ППМ)
Доступные безопасные ППМ на основном маршруте:	Доступные безопасные ППМ на основном маршруте:
1. Node CRA	1. Node DAN
2. Node SOSPA	2. Node DADEN
3. Node LKH	3. Node MULAD
4. Node KADUM	4. Node DONXO
5. Node SAPEN	5. Node POPET
Выберите безопасный ППМ: 2	Выберите безопасный ППМ: 4
Обработка маршрута 3 от TSH до BUNTA	Обработка маршрута 4 от CRA до DAN
ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:	ППМ выхода с основного маршрута, доступные для выбора:
1. MUMGA	1. PCA
2. MULAD	2. KAMGO
3. DONXO	3. KARAN
4. TSH	4. CRA
ППМ возврата на основной маршрут, доступные для выбора:	ППМ возврата на основной маршрут, доступные для выбора:
1. BUNTA	1. DAN
Выберите индекс ППМ выхода: 2	Выберите индекс ППМ выхода: 3
Выберите индекс ППМ возврата: 1	Выберите индекс ППМ возврата: 1

Рисунок 3.18. Список доступных ППМ для выбора альтернативного маршрута в сценарии 3, ситуации 2, конфигурации 1

В данной конфигурации два маршрута, TSH – BUNTA и CRA – DAN, работают в соответствии со случаем 1, поскольку ЗОП не оказывают влияния на конечный ППМ этих маршрутов. В качестве ППМ выхода с основного маршрута выбраны MULAD и KARAN, а ППМ возврата на основной маршрут – BUNTA и DAN, соответственно, для маршрутов TSH – BUNTA и CRA – DAN. Для двух оставшихся маршрутов, CRA – PQU и DAN – PQU, поскольку конечный ППМ подвергается влиянию ЗОП, выбирается случай 2. В этом случае ППМ SOSPA и DONXO выбраны в качестве безопасных ППМ, чтобы альтернативный маршрут В этом случае ППМ SOSPA и DONXO выбраны в качестве безопасных ППМ, чтобы альтернативный маршрут мог выйти с основного маршрута и следовать к новому конечному ППМ к новому конечному ППМ. Особенно для маршрута DAN – PQU, поскольку он подвергается воздействию двух ЗОП в разных участках, может также применяться случай 3, при котором в качестве ППМ выбран DONXO.

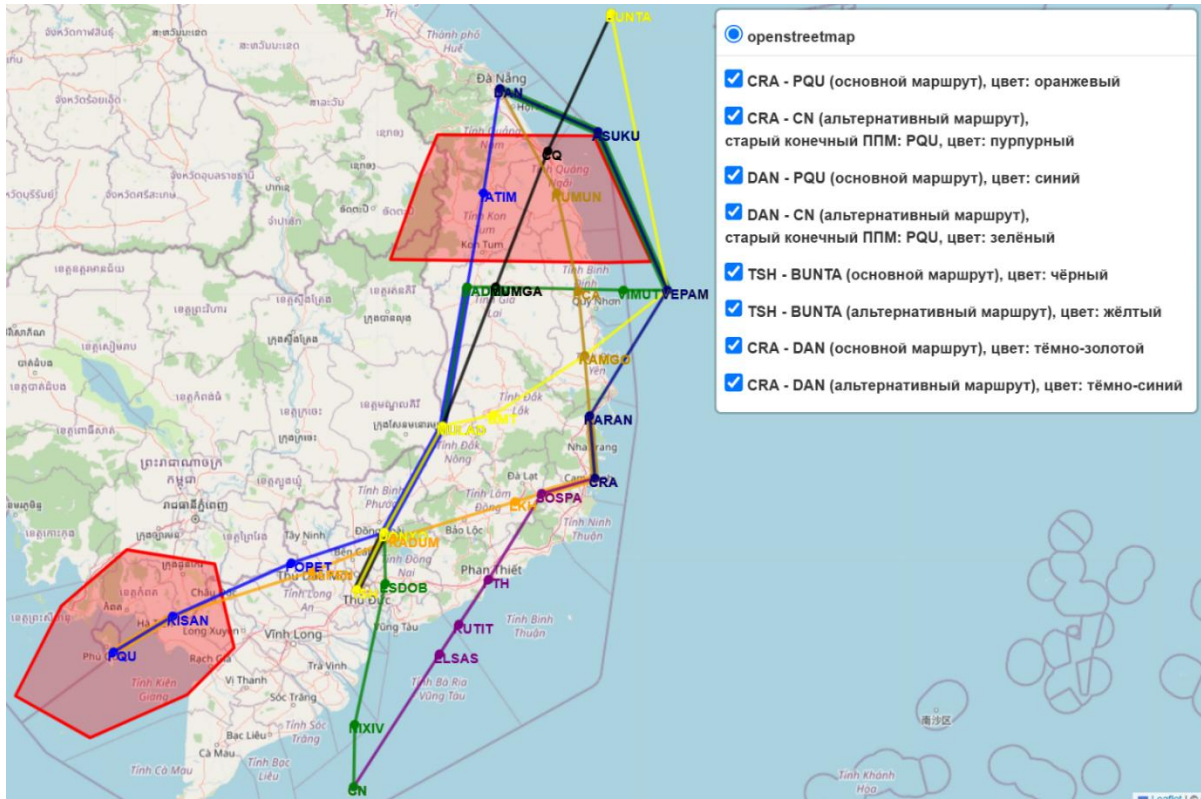


Рисунок 3.19. Результат сценария 3, случаев 1 и 2, ситуации 2, конфигурации 1

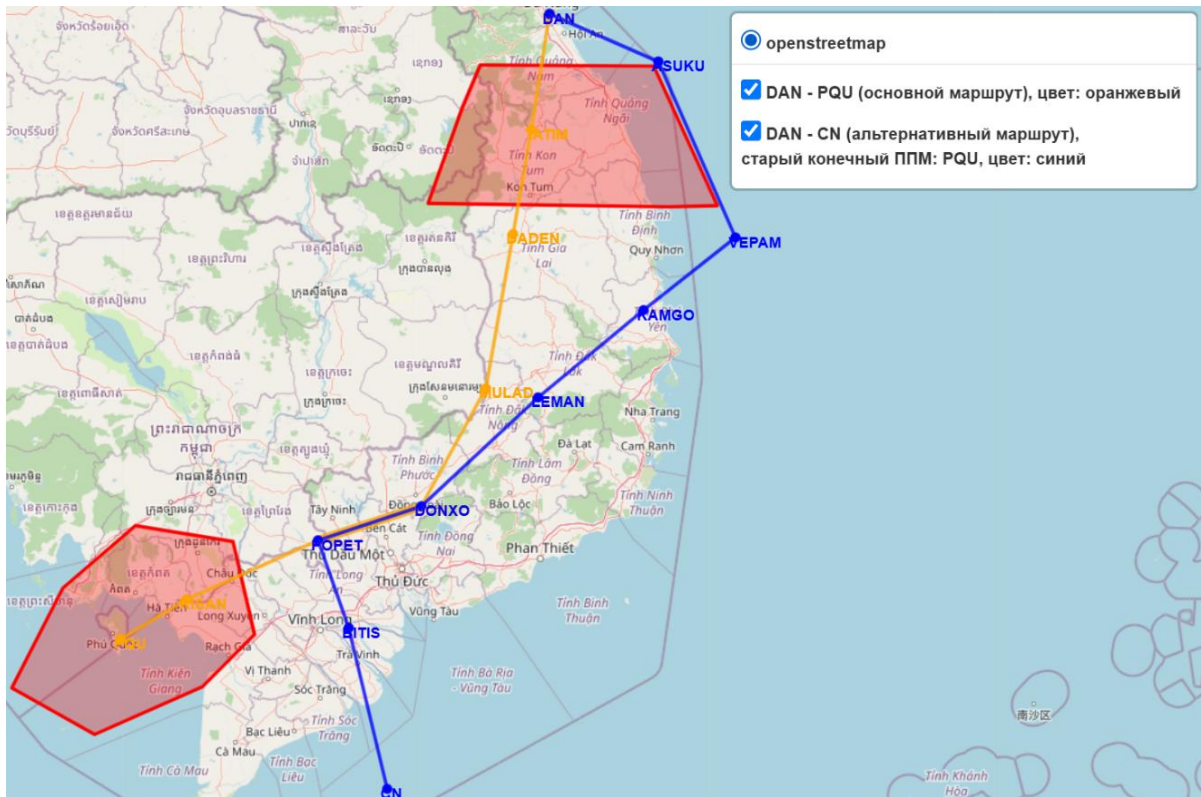


Рисунок 3.20. Результаты сценария 3, случая 3, ситуации 2, конфигурации 1

На рисунках 3.19 и 3.20 показаны результаты выбора альтернативных маршрутов: для случаев 1 и 2 (TSH – BUNTA, CRA – DAN, CRA – PQU, DAN – PQU) и для случая 3 (маршрут DAN – PQU) соответственно.

Таблицы 3.6 - 3.9 содержат результаты анализа ремаршрутизации маршрутов в конфигурации 1, ситуации 2, включая перечень ППМ и протяжённость маршрутов.

Таблица 3.6. Альтернативный маршрут TSH - BUNTA в ситуации 2, конфигурации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
732 км TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA	831,7 км TSH - KADUM - LEMAN - KAMGO - VEPAM - BUNTA	914,3 км TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - VIMUT - VEPAM - BUNTA	852,3 км TSH - DONXO - MULAD - BMT - KAMGO - VEPAM - BUNTA

Таблица 3.7. Альтернативный маршрут CRA - DAN в ситуации 2, конфигурации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
471,2 км CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - DAN	556,7 км CRA - VEPAM - ASUKU - DAN	644 км CRA - KARAN - KAMGO - PCA - VIMUT - VEPAM - ASUKU - DAN	567,4 км CRA - KARAN - VEPAM - ASUKU - DAN

Таблица 3.8. Альтернативный маршрут CRA - PQU в ситуации 2, конфигурации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 2
602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	461,3 км CRA - ELSAS - CN	607,6 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - BITIS - CN	474,4 км CRA - SOSPA - PTH - RUTIT - ELSAS - CN

Таблица 3.9. Альтернативный маршрут DAN - PQU в ситуации 2, конфигурации 1

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 2	Сценарий 3 - Случай 3
885,7 км DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU	1009,8 км DAN - ASUKU - VEPAM - KARAN - ELSAS - CN	1248,9 км DAN - ASUKU - VEPAM - VIMUT - MUMGA - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - BITIS - CN	1163,3 км DAN - ASUKU - VEPAM - VIMUT - MUMGA - DADEN - MULAD - DONXO - ESDOB - NIXIV - CN	1145,4 км DAN - ASUKU - VEPAM - KAMGO - LEMAN - DONXO - POPET - BITIS - CN

Для второй конфигурации две ЗОП частично перекрываются, при этом одна ЗОП представляет собой многоугольник, определенный координатами (13,931; 108,241), (14,135; 107,904), (13,771; 107,827), (13,430; 107,888), (13,613; 108,254), а другая ЗОП является окружностью с центром в точке с координатами (14,006; 108,024) и радиусом 35 км. Проведение этапов выбора и анализа выполняется согласно конфигурации 1. Рисунок 3.21 демонстрирует результаты анализа маршрутов ОВД, затронутых появлением двух ЗОП, выявленных в конфигурации 2.

- Список 1: Маршруты с затронутыми конечными ППМ:
- Маршрут от TSH до PLK
Полный маршрут: TSH - DONXO - MULAD - PLK
Затронутые ППМ: PLK
Затронутые участки: (MULAD->PLK)
- Список 2: Маршруты с затронутыми начальными ППМ:
- Список 3: Маршруты с затронутыми промежуточными ППМ/участками:
- Маршрут от TSH до DAN
Полный маршрут: TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN
Затронутые ППМ: DADEN
Затронутые участки: (MULAD->DADEN), (DADEN->TATIM)
 - Маршрут от TSH до BUNTA
Полный маршрут: TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA
Затронутые ППМ: MUMGA
Затронутые участки: (MULAD->MUMGA), (MUMGA->CQ)
 - Маршрут от DAN до PQU
Полный маршрут: DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU
Затронутые ППМ: DADEN
Затронутые участки: (TATIM->DADEN), (DADEN->MULAD)
 - Маршрут от ANINA до ARESI
Полный маршрут: ANINA - MUMGA - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI
Затронутые ППМ: MUMGA
Затронутые участки: (ANINA->MUMGA), (MUMGA->VIMUT)

Рисунок 3.21. Результаты анализа маршрута ОВД в ситуации 2, конфигурации 2

Для анализа были выбраны три маршрута: TSH – PLK, TSH – DAN и ANINA – ARESI. На маршруте TSH – PLK конечный ППМ оказался под воздействием ЗОП, поэтому в качестве нового конечного ППМ выбран PCA. В сценарии 3 для маршрута TSH – DAN определены ППМ выхода – DONXO и ППМ возврата – TATIM, тогда как для маршрута ANINA – ARESI ППМ выхода – ANINA, а ППМ возврата – MESOX. На маршруте TSH – PLK, несмотря на наличие двух ЗОП, их наложение затрагивает одни и те же участки, что позволяет рассматривать их как единую ЗОП. Следовательно, для маршрута TSH – PLK будет применён случай 2 с выбранным ППМ DONXO.

Рисунки 3.22 - 3.24 показывают альтернативные маршруты для трёх сценариев. Таблицы 3.10 - 3.12 содержат анализ ремаршрутизации для конфигурации 2 в сценарии 3, включая список ППМ и протяжённость маршрутов.

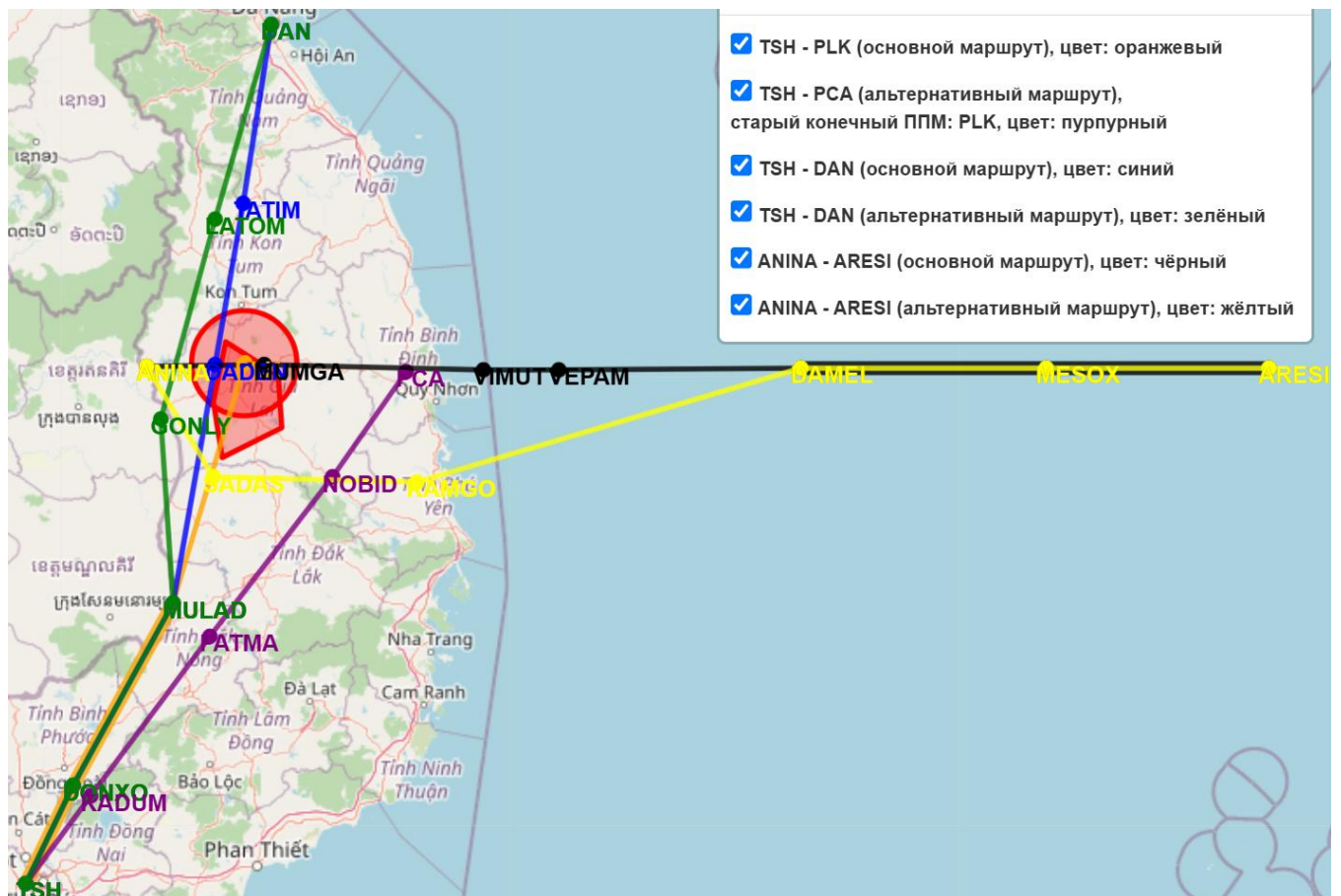


Рисунок 3.22. Результат сценария 1 ситуации 2 конфигурации 2

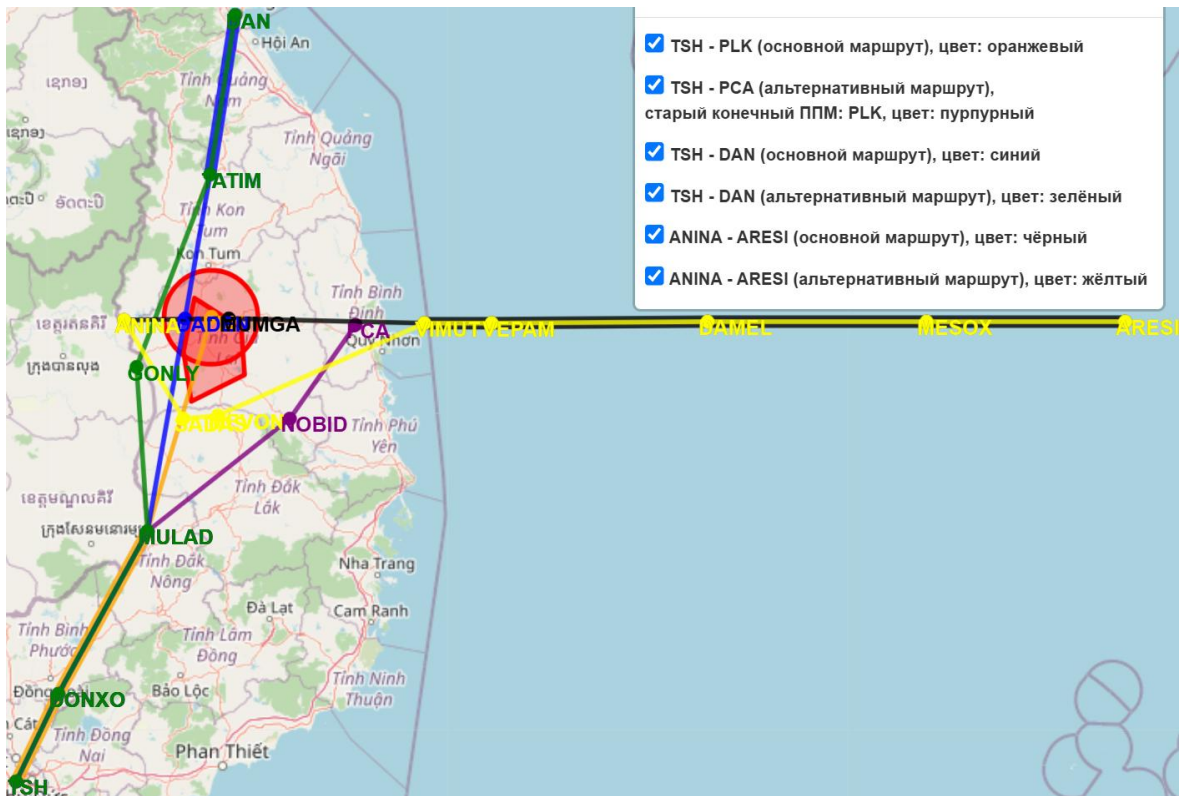


Рисунок 3.23. Результат сценария 2 ситуации 2 конфигурации 2

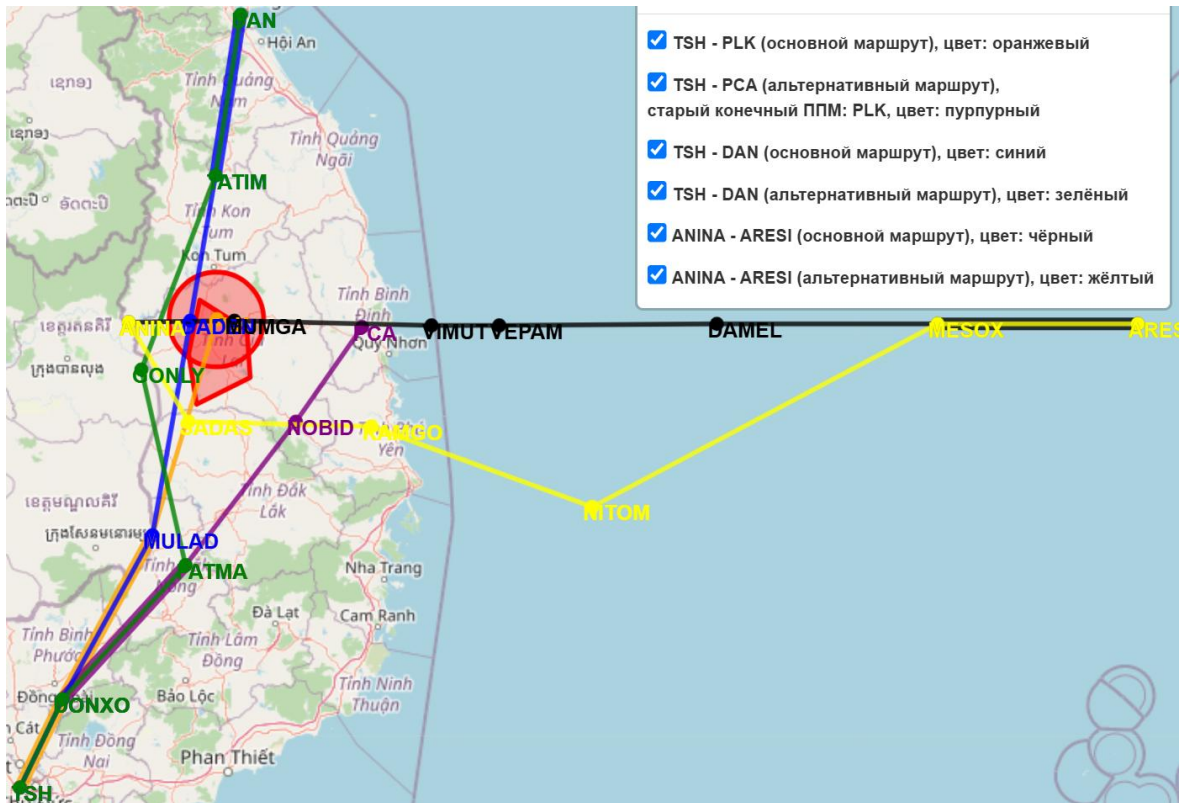


Рисунок 3.24. Результат сценария 3 ситуации 2 конфигурации 2

Таблица 3.10. Альтернативный маршрут TSH - DAN в ситуации 2, конфигурации 2

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	617,1 км TSH - DONXO - MULAD - GONLY - LATOM - DAN	618,6 км TSH - DONXO - MULAD - GONLY - TATIM - DAN	641,3 км TSH - DONXO - PATMA - GONLY - TATIM - DAN

Таблица 3.11. Альтернативный маршрут TSH - BUNTA в ситуации 2, конфигурации 2

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 1
758,5 км ANINA - MUMGA - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI	812 км ANINA - SADAS - KAMGO - DAMEL - MESOX - ARESI	815,2 км ANINA - SADAS - MEVON - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI	846,7 км ANINA - SADAS - KAMGO - NITOM - MESOX - ARESI

Таблица 3.12. Альтернативный маршрут TSH - PLK в ситуации 2, конфигурации 2

Основной маршрут	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3 - Случай 2
386,126 км TSH - DONXO - MULAD - PLK	434,9 км TSH - KADUM - PATMA - NOBID - PCA	442,5 км TSH - DONXO - MULAD - NOBID - PCA	436,9 км TSH - DONXO - PATMA - NOBID - PCA

При анализе результатов, полученных для ситуации 2, можно сделать вывод, что модель надёжно обеспечивает динамическую ремаршрутизацию, удовлетворяя как целевую функцию, так и ограничения, предусмотренные для различных сценариев. В сценарии 1 модель неизменно предлагает альтернативный маршрут с минимальной протяжённостью, что соответствует классической стратегии оптимизации маршрутов. Сценарий 2 демонстрирует, что выбранный маршрут максимально приближен к исходному основному маршруту, за исключением

отдельных участков, где необходимы корректировки для обхода обозначенных ЗОП. В сценарии 3 модель проявляет высокую гибкость, позволяя динамически формировать альтернативные маршруты на основе ППМ, заданных пользователем. Такой подход существенно расширяет возможности адаптации маршрута в реальном времени в зависимости от операционных условий и решений диспетчера.

Кроме того, модель подтверждает свою адаптивность и устойчивость при выборе альтернативного конечного ППМ в тех случаях, когда изначально заданный конечный ППМ маршрута становится недоступным. Это свойство играет ключевую роль в обеспечении непрерывности операций и эффективного управления маршрутами в реальных эксплуатационных условиях, позволяя минимизировать задержки и повышать общую надёжность системы ОрВД.

Результаты, полученные на основе двух конфигураций, дополнительно подтверждают надёжность и адаптивность модели, демонстрируя ее независимость от расположения, формы и количества ЗОП, встречаемых на основном маршруте. Независимо от того, являются ли ЗОП отдельными или пересекающимися, модель всегда предлагает наиболее оптимальный вариант ремаршрутизации, строго соблюдая установленные ограничения. Эта независимость свидетельствует о том, что модель не опирается на заранее заданные предположения относительно ограничений ВП, а вместо этого динамически адаптируется к различным ограничениям в режиме реального времени. Такая адаптивность особенно важна в условиях сложной воздушной обстановки, где параметры ЗОП могут изменяться под воздействием географических и политических факторов, специальных операций или экстренного закрытия ВП.

Результаты анализа ситуаций 1 и 2 демонстрируют, что предложенная модель может быть успешно применена на различных этапах ОПВД, включая стратегический и предтактический этапы, где приоритет отдается планированию и прогнозированию, а также тактический этап, на котором ключевое значение приобретают гибкость и способность адаптироваться в режиме реального времени к

изменяющимся условиям. Особенно важно подчеркнуть, что такая адаптивность играет решающую роль в условиях ВП с высокой интенсивностью полётов, где обеспечение эффективности и БП становится первостепенной задачей. Внедрение подобной модели позволяет не только минимизировать задержки и перераспределять ресурсы с учетом оперативной обстановки, но и повышать устойчивость всей системы УВД, снижая риски перегрузки и оптимизируя ИВП.

Таким образом, возможность интеграции динамических корректировок в режиме реального времени подчёркивает научный потенциал и практическую значимость модели для использования в сложных логистических и транспортных сетях. Применение данной модели позволяет оперативно реагировать на внешние факторы, минимизируя потери и оптимизируя маршруты, что является существенным преимуществом в современных условиях, когда эффективность и адаптивность являются ключевыми требованиями для обеспечения устойчивости транспортных процессов.

Выводы по главе 3

1. Математическая модель и модель оптимизации для динамической ремаршрутизации были разработаны и могут применяться на всех трёх этапах: стратегическом, предтактическом и тактическом.

2. Результаты применения модели динамической ремаршрутизации в смоделированных ситуациях, охватывающих все случаи и сценарии, были тщательно проанализированы и продемонстрировали высокую эффективность и точность модели. Эти данные подтверждают её способность адаптироваться к различным условиям и обеспечивать оптимальные решения даже в сложной и меняющейся обстановке.

3. Результаты исследования подтверждают не только применимость метода в заданном контексте, но и его высокую масштабируемость. Это позволяет использовать его для адаптации к различным задачам и целям, обеспечивая эффективное управление маршрутами в динамически меняющемся ВП.

4. Предложенная модель динамической ремаршрутизации отличается универсальностью и широкими возможностями применения. Гибкая настройка входных данных позволяет адаптироваться к различным ВП, а динамическая коррекция параметров повышает эффективность в разных условиях эксплуатации, оптимизируя маршруты и повышая надёжность системы УВД.

Глава 4. Оценка результатов исследования и возможностей практического применения разработанных моделей в организации воздушного движения

4.1. Сравнительный анализ результатов исследования оптимизированной и существующей сети маршрутов обслуживания воздушного движения

Для оценки результатов исследования модели оптимизации результаты маршрутов ОВД из выбранного сценария сравниваются с текущими маршрутами, используемыми в реальных условиях, и представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Сравните результаты оптимизированных маршрутов в выбранном сценарии с существующими маршрутами ОВД

	Оптимальный маршрут ОВД	Существующий маршрут ОВД
TSH – DAN	612,2 км TSH - DONXO - MULAD - DADEN - TATIM - DAN	667,7 км TSH - AC - DOVIN - BMT - ENGIM - MUMGA - BANSU - SADIN - DAN
CRA – PQU	602,2 км CRA - SOSPA - LKH - KADUM - SAPEN - KISAN - PQU	615,7 км CRA - SOSRA - LKH - VETOM - AC - ESDOB - TSH - ATGAS - TUNPO - PQU
TSH – ARESI	930,2 км TSH - ENRIN - SOSPA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI	934,8 км TSH - ESDOB - AC - VETOM - LKH - SOSRA - CRA - ATVIT - NITOM - MESOX - ARESI
TSH – IGARI	548,1 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - IGARI	552,3 км TSH - BITIS - ANHOA - BIBAN - BITOD - IGARI
TSH – BUNTA	732 км TSH - DONXO - MULAD - MUMGA - CQ - BUNTA	757 км TSH - KADUM - PATMA - BMT - NOBID - PCA - ASUKU - BUNTA

	Оптимальный маршрут ОВД	Существующий маршрут ОВД
DAN – PQU	885,7 км DAN - TATIM - DADEN - MULAD - DONXO - POPET - KISAN - PQU	969,4 км DAN - SADIN - BANSU - MUMGA - BMT - DOVIN - AC - TSH - ATGAS - TUNPO - PQU
CRA – BUNTA	539,1 км CRA - KARAN - ASUKU - BUNTA	540,8 км CRA - NHATA - KARAN - KAMGO - PCA - ASUKU - BUNTA
TSH – DUDIS	424,8 км TSH - XOBAY - LITAM - DUDIS	425,4 км TSH - XOBAY - NIXIV - CN - DUDIS
TSH – POPET	82,6 км TSH - POPET	82,7 км TSH - SAEN - POPET
EXOTO – ESPOB	1105,2 км EXOTO - VEPAM - KARAN - ELSAS - CN - ESPOB	1105,3 км EXOTO - VEPAM - KARAN - SOSPA - PTH - ELSAS - CN - ESPOB
DUDIS – DONDA	1027,5 км DUDIS - DAGAG - SUDUN - DAMVO - NITOM - DAMEL - DONDA	1027,5 км DUDIS - DAGAG - SUDUN - DAMVO - NITOM - DAMEL - DONDA
MIGUG – MELAS	1110,3 км MIGUG - MESOX - MUGAN - MIMUX - MAPNO - OSIXA - MOXON - MELAS	1110,3 км MIGUG - MESOX - MUGAN - MIMUX - MAPNO - OSIXA - MOXON - MELAS
AKMON – ARESI	788,8 км AKMON - UDOSI - ALDAS - AGSAM - ANOKI - ARESI	788,8 км AKMON - UDOSI - ALDAS - AGSAM - ANOKI - ARESI
CRA – DAN	471,2 км CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - DAN	474,1 км CRA - KARAN - KAMGO - PCA - KUMUN - CQ - DAN
TSH – PANDI	806,3 км TSH - BUKMA - MATGI - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI	806,4 км TSH - BUKMA - MATGI - PTH - AGSIS - DAMVO - MIMUX - AGSAM - PANDI
TSH – AKMON	486,4 км TSH - LOSON - MOXON - AKMON	486,4 км TSH - LOSON - MOXON - AKMON
PANDI –	1258,2 км	1258,2 км

	Оптимальный маршрут ОБД	Существующий маршрут ОБД
IGARI	PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI	PANDI - ALDAS - MAPNO - SAMAP - CN - VIGEN - BITOD - IGARI
PQU – IGARI	367,3 км PQU - ADBOP - IGARI	392,1 км PQU - ADBOP - BITOD - IGARI
ANINA – ARESI	758,5 км ANINA - MUMGA - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI	758,6 км ANINA - DADEN - PLK - MUMGA - PCA - VIMUT - VEPAM - DAMEL - MESOX - ARESI
PCA – TRN	563,7 км PCA - NOBID - PATMA - DONXO - RUNOP - MOXEB - TRN	564,1 км PCA - NOBID - BMT - PATMA - DONXO - RUNOP - MOXEB - TRN
LKH – BMT	104,5 км LKH - ONEBI - BMT	104,5 км LKH - ONEBI - BMT
TSH – PLK	386,1 км TSH - DONXO - MULAD - PLK	426,6 км TSH - ESDOB - AC - BMT - MEVON - PLK
TSH – RG	191,4 км TSH - POTIX - RG	191,4 км TSH - POTIX - RG
TSH – VTV	69,3 км TSH - VTV	69,3 км TSH - VTV
VTV – CN	189,3 км VTV - TULTU - LITAM - CN	189,3 км VTV - TULTU - LITAM - CN
XONAN – IGARI	269,3 км XONAN - SAMOG - IGARI	269,3 км XONAN - SAMOG - IGARI
DADEM – CN	285 км DADEM - ANHOA - CONDA - CN	285,1 км DADEM - ATGAS - POTIX - TRN - ANHOA - VEPKI - CONDA - CN
KISAN – IPRIX	398,3 км KISAN - TUNPO - BITOD - IPRIX	398,3 км KISAN - TUNPO - BITOD - IPRIX
TSH – TRN	131,7 км TSH - ENPAS - TRN	131,7 км TSH - ENPAS - TRN
TSH – QL	244,1 км TSH - BITIS - QL	247,9 км TSH - ENPAS - TRN - QL

	Оптимальный маршрут ОВД	Существующий маршрут ОВД
Параллельно с TSH – DAN	644,1 км HAMTA - VISAO - NASEN - BMT - LEMAN - HESIN - THALY - ENRIN - TSH	666,380 км HUE - PATNO - LATOM - DADEN - SADAS - PATMA - KADUM - TSH
	17 013,4 км	17 297,4 км

Согласно данным, представленным в таблице 4.1, из 31 исследуемого маршрута ОВД на 19 маршрутах зафиксировано сокращение протяжённости. Среди них некоторые оптимизированные маршруты значительно уменьшили свою протяжённость, например, маршрут DAN – PQU уменьшился на 83,6 км (8,6%) или маршрут TSH – PLK был сокращён на 40,5 км (9,5%). Эти изменения обеспечивают более рациональное ИВП и способствуют увеличению ПС маршрутов ОВД. Существуют также маршруты ОВД, имеющие незначительное сокращение протяжённости, менее 1 км. Например, такие маршруты, как TSH – POPET, EXOTO – ESPOB, TSH – PANDI, ANINA – ARESI, DADEM – CN (все сокращены всего на 0,1 км) и PCA – TRN (сокращение на 0,4 км). Несмотря на незначительность этих изменений в абсолютных значениях, ключевым аспектом их оптимизации станет снижение количества ППМ. Это позволит минимизировать число докладов о местоположении ВС в процессе оказания услуг УВД, что, в свою очередь, снизит нагрузку как на экипажи ВС, так и на диспетчеров.

В совокупности оптимизированные маршруты позволят уменьшить общую протяжённость на 284 км, что должно стать значительным вкладом в повышение операционной эффективности. Новая структура маршрутов будет обеспечивать более прямолинейные траектории полёта, что, возможно, упростит навигацию, снизит расход топлива и уменьшит общее время полёта ВС. Согласно ИКАО [98], средний расход топлива на морскую милю составляет 11 кг/NM, что соответствует 5,9 кг/км. В результате применения модели оптимизации сети маршрутов ОВД общая протяжённость маршрутов была сокращена на 284 км, что эквивалентно

экономии 1 675,6 кг топлива. Для маршрута DAN – PQU сокращение составило 83,6 км, что соответствует 493,3 кг топлива на один рейс. Если учитывать тип ВС, уменьшение протяжённости маршрутов на 284 км привело бы к экономии топлива в размере 1130,3 кг для ВС типа A320/B747-800, 1800,6 кг для ВС типа A330-200 и 2064,7 кг для ВС типа B787-9 [99]. При среднем суточном трафике 1 200 – 1 400 рейсов в ВП РДЦ Хошимина, общая экономия топлива оценивается в 2 010 720 – 2 345 840 кг, что эквивалентно сокращению выбросов CO₂ на 6 354 – 7 413 тонн, исходя из среднего коэффициента ИКАО: 1 кг авиационного топлива типа А ≈ 3,16 кг CO₂ [100].

Эти факторы будут способствовать не только экономической эффективности полётов, но и повышению БП. Дополнительно, сокращение отклонений от оптимальных траекторий движения будет способствовать уменьшению количества так называемых «горячих точек» (hot spots) – зон повышенной вероятности возникновения ПКС. Это, вероятно, сократит объём координационной работы диспетчеров и уменьшит частоту ведения радиообмена между экипажами ВС и центрами УВД. Таким образом, будет достигаться комплексное снижение когнитивной и операционной нагрузки на всех участников процесса ВД, что не только будет повышать уровень БП, но и будет способствовать увеличению ПС ВП, что особенно важно в условиях растущей интенсивности ВД.

4.2. Применение модели динамической ремаршрутизации для разработки «playbook routes»

Согласно оценкам ИАТА [90], к 2040 году Азиатско-Тихоокеанский регион будет обеспечивать почти 40% от общего мирового пассажиропотока, что эквивалентно более чем 4 миллиардам пассажиров ежегодно, наряду с европейским

регионом, который, при своей неизменно высокой плотности полётов, продолжит оставаться ключевым звеном в глобальной авиационной системе. В связи с этим существующая инфраструктура ОПВД испытывает все возрастающее давление, стремясь одновременно справляться с ростом объемов полётов, обеспечивать эксплуатационную эффективность и поддерживать высокий уровень БП. На фоне этого роста пунктуальность рейсов сталкивается с серьезными вызовами по всему миру, при этом значительное снижение показателей наблюдается как в Европе, так и в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Согласно отчету EUROCONTROL [91], показатель пунктуальности рейсов в Европе снизился до самого низкого уровня за последние два десятилетия: лишь 70,6% рейсов прибывают в пределах 15 минут от запланированного времени. Существенные задержки, связанные с ОПВД, зафиксированные в 2022 и 2023 годах, стали одним из ключевых факторов снижения этого показателя. Между тем, в Азиатско-Тихоокеанском регионе, согласно ИАТА [92], около 27% задержек рейсов обусловлены метеорологическими факторами, что приводит к увеличению среднего времени ожидания в воздухе на 12 – 15 минут для каждого затронутого рейса. Эти данные свидетельствуют о тревожной тенденции роста перегруженности ВП и увеличения задержек рейсов во многих регионах мира. Данная проблема не только создает серьезные эксплуатационные трудности для авиакомпаний и органов ОПВД, но и приводит к росту расхода топлива, увеличению эксплуатационных затрат и усиленному воздействию на окружающую среду вследствие избыточных выбросов углерода. Растущая частота и серьезность задержек полётов подчеркивают необходимость разработки комплексных стратегий для повышения эффективности ОПВД, оптимизации полётных операций и устранения системных факторов, способствующих данным сбоям.

Концепция «playbook routes» в данном контексте представляет собой структурированное и динамическое решение в ОПВД. «playbook routes» представляет собой набор заранее определённых альтернативных маршрутов, которые могут гибко применяться в зависимости от реальных условий. Эта мера

ОПВД обеспечивает адаптивность и гибкость при ремаршрутизации в соответствии с заранее определёнными сценариями. Её использование позволяет оперативно активировать альтернативные маршруты в зависимости от текущей ситуации в ВП, повышая эффективность и БП. В отличие от традиционного планирования маршрутов, часто предполагающего реактивные корректировки, «playbook routes» обеспечивает проактивный подход, позволяя более эффективно ИВП и снижать нагрузку на диспетчеров. Интеграция альтернативных маршрутов в эксплуатационные процедуры способствует более эффективному ОПВД, сокращению времени ожидания в воздухе и оптимизации ИВП. Применение таких структурированных стратегий маршрутизации уже доказало свою эффективность в условиях высоконагруженного ВП по всему миру. Их использование позволяет гибко реагировать на изменения метеоусловий, перераспределять воздушные потоки в периоды пиковых нагрузок и обеспечивать согласованность действий между различными подразделениями УВД.

В США Федеральное управление ГА внедрило «playbook routes» в национальную систему ВП с целью снижения загруженности и повышения предсказуемости операций. Эмпирические исследования показывают, что применение «playbook routes» в США привело к сокращению задержек, вызванных неблагоприятными метеоусловиями, на 10 – 15%, а также к снижению среднего расхода топлива на рейс на 5% [93]. Аналогично, Европейский центр ОПВД реализовал структурированные стратегии перераспределения маршрутов в ключевых воздушных районах Европы, таких как РПИ Реймс, РПИ Маастрихт и РПИ Лондон, что способствовало оптимизации потоков ВД и снижению времени задержек в воздухе [94]. Была разработана автоматизированная система «playbook routes» для УВД беспилотных авиационных систем, которая использует пространственно-временные сценарные данные для оптимизации траекторий в режиме реального времени путем извлечения и адаптации заранее вычисленных оптимальных маршрутов [95].

Результаты внедрения, рассмотренные выше, и исследования убедительно доказывают эффективность, значимость и необходимость дальнейшей разработки «playbook routes», содержащей детальную информацию о возможностях ремаршрутизации в случае необходимости. Это играет ключевую роль в повышении эффективности ОПВД. В выбранной и представленной в данном исследовании сети маршрутов ОВД в ВП Хошимаина, разработанной на основе оптимизационного анализа, помимо уже обозначенных временных маршрутов, проходящих через бесполётные зоны, и альтернативных маршрутов для них в случае необходимости (как подробно изложено в разделе 2.6), сохраняется необходимость разработки дополнительных альтернативных маршрутов для других основных направлений, таких как параллельный маршрут НАМТА - TSH. Как уже было отмечено, данный маршрут пересекает две зоны ограничения полётов, верхняя граница которых составляет 8000 м (ЭП260). Хотя на практике ВС, следуя этим маршрутом, обычно выдерживают ЭП выше установленных ограничений, нельзя исключать ситуации, когда по причине возникновения неблагоприятных условий (отказа авиатехники, сложных метеоусловий и т.п.) может возникнуть необходимость временного снижения ниже установленной границы. В подобных случаях заранее определенный альтернативный маршрут приобретает критическое значение, позволяя диспетчерам оперативно предложить оптимальное решение, минимизируя задержки и обеспечивая бесперебойное, эффективное и безопасное УВД.

Благодаря своим преимуществам, высокой точности и надежности, предложенная модель ремаршрутизации может быть использована для разработки альтернативных маршрутов к основному маршруту и включения их в «playbook routes». Например, при создании «playbook routes» для маршрута ОВД НАМТА – TSH в модель будут включены две зоны ограничения полётов, VVR11 и VVR18, чтобы определить альтернативные маршруты, обходящие эти зоны. Поскольку маршруты в «playbook routes» разрабатываются для ОПВД на всех трёх этапах – стратегическом, предтактическом и тактическом, наиболее предпочтительным

вариантом является сценарий 1. Данный приоритет обусловлен тем, что сценарий 1 предлагает кратчайший альтернативный маршрут, сохраняя при этом допустимый уровень отклонения от основного маршрута. Минимизация протяжённости обеспечивает значительные экономические и эксплуатационные преимущества для операторов ВС и авиакомпаний, включая улучшение топливной эффективности, снижение эксплуатационных затрат и оптимизацию ИВП. Сценарий 2 рассматривается как второй по предпочтительности вариант, так как он гарантирует, что перенаправление рейсов соответствует нормативным требованиям ОВД в отношении отклонения от основного маршрута. Этот сценарий предусматривает возможность максимально быстрого возвращения на исходный маршрут после преодоления ограниченной зоны, что минимизирует влияние на общую траекторию полёта. В контексте разработки «playbook routes» сценарий 3 не представляется целесообразным, поскольку в данном случае избыточная гибкость не требуется при планировании резервных маршрутов. Однако при построении альтернативного маршрута для НАМТА – TSH необходимо учитывать боковое расстояние между его ППМ и ППМ параллельного маршрута TSH – DAN. ППМ на TSH – DAN, а также ППМ между двумя основными маршрутами перед ППМ THALY (соответственно, ППМ DONXO на маршруте TSH – DAN), не соответствующие минимальному интервалу в 10 морских миль, не должны использоваться. Выбор ППМ THALY обусловлен тем, что именно в этом ППМ основной маршрут НАМТА – TSH начинает изменять направление к TSH и больше не остается параллельным маршруту TSH – DAN. Перечень маршрутов, включенных в «playbook routes» для НАМТА – TSH, представлен в таблице 4.2, а на рисунке 4.1 визуализированы альтернативные маршруты к основному маршруту.

Так же методология может быть применена и расширена на другие маршруты ОВД, что в конечном итоге позволит сформировать всеобъемлющую, унифицированную и стандартизированную систему так называемых «playbook routes». При внедрении этой системы в ОПВД появляется возможность заранее разрабатывать резервные

маршруты и оптимизировать управление трафиком в реальном времени. Это особенно актуально в условиях перегрузки ВП, неблагоприятных погодных условий или нештатных ситуаций, когда требуется быстрое и скоординированное решение. Внедрение «playbook routes» способствует улучшению взаимодействия между секторами, снижению нагрузки на диспетчеров и минимизации рисков ошибок, обеспечивая их проработанными запасными решениями для быстрого и гибкого реагирования на изменения в ВП, повышения устойчивости и снижения сбоев.

Таблица 4.2. Список маршрутов в «playbook routes» для HAMTA - TSH

	Список ПИМ	Протяжённость
Основной маршрут	HAMTA - VISAO - NASEN - BMT - LEMAN - HESIN - THALY - ENRIN - TSH	644,1 км
Альтернативный маршрут №1	HAMTA - BINKU - ASUKU - KUMUN - NASEN - ENGIM - PATMA - KADUM - TSH	789,9 км
Альтернативный маршрут №2	HAMTA - BINKU - ASUKU - KUMUN - VISAO - NASEN - BMT - LEMAN - HESIN - THALY - ENRIN - TSH	821,9 км

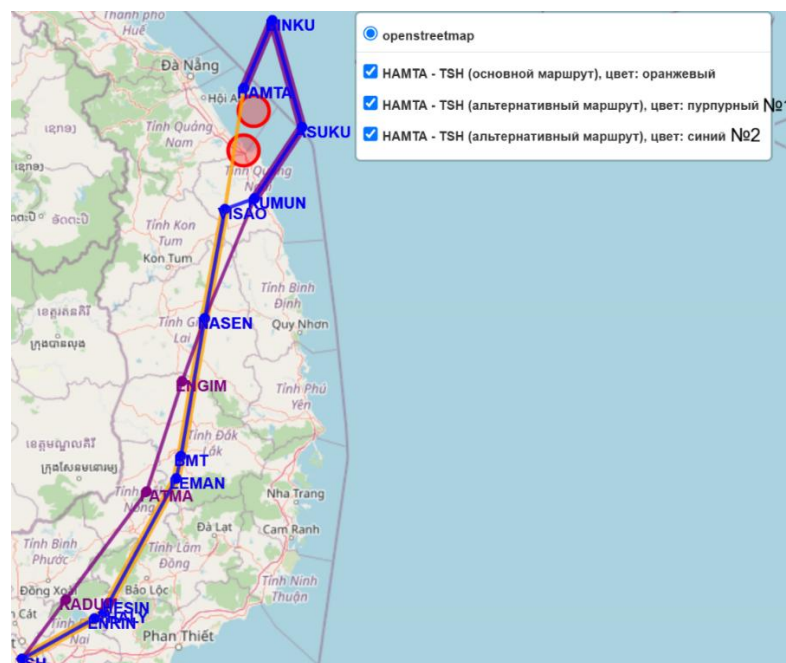


Рисунок 4.1. Маршруты в «playbook routes» для HAMTA – TSH

4.3. Применение моделей оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения и динамической ремаршрутизации в проектировании воздушного пространства и использования воздушного пространства

Помимо повышения ПС ВП и снижения протяжённости маршрутов ОВД, модель оптимизации сети маршрутов ОВД представляет собой эффективный инструмент для повышения ИВП и обеспечения БП. Модель оптимизации сети маршрутов ОВД обеспечивает систематическую реорганизацию проектирования ВП, особенно в районах с ограниченной ПС, что позволяет более рационально распределять нагрузку между различными маршрутными коридорами. Используя существующие ППМ, модель формирует оптимальную структуру сети маршрутов ОВД с учётом заданных ограничений и условий. Выбор того или иного сценария из предложенных моделью результатов определяется текущими потребностями и приоритетами организации, управляющей ВП, что обеспечивает наиболее рациональное использование сети маршрутов ОВД. При этом отсутствие необходимости изменять координаты исходных ППМ позволяет использовать уже существующую навигационную инфраструктуру, что не только сокращает затраты на строительство новых наземных средств, но и ускоряет внедрение оптимизированной сети маршрутов, повышая оперативность УВД. Такой подход способствует не только сокращению протяжённости маршрутов и повышению эффективности ИВП без дополнительных инфраструктурных затрат, но и снижению потребления топлива, уменьшению выбросов парниковых газов и шумового воздействия, что делает его важным инструментом для устойчивого развития авиационной отрасли.

Кроме того, концепция модели может быть использована и при проектировании совершенно нового ВП. В таком случае на первом этапе формируется перечень ППМ, основанный на возможностях существующих навигационных технологий, а также параметрах радиолокационной и спутниковой

инфраструктуры. Далее модель применяется для построения оптимизированной сети маршрутов ОВД, учитывающей предполагаемые эксплуатационные условия и ограничения. Такой подход обеспечивает высокую гибкость планирования, позволяя заранее оценивать различные сценарии развития ВД, выявлять потенциальные узкие места и прогнозировать распределение нагрузки на ключевые участки ВП. Это особенно важно при проектировании районов с ожидаемой высокой интенсивностью трафика, где требуется обеспечить одновременно эффективность, устойчивость и безопасность структуры маршрутов.

Модель динамической ремаршрутизации обладает широкими возможностями применения как на этапе предварительного планирования ИВП, так и в процессе непосредственного УВД в реальном времени, она одновременно представляет собой инструмент для оперативного и эффективного планирования ИВП. На стратегическом и предтактическом уровнях модель может быть использована для оперативной подготовки планов эксплуатации ВП в условиях, когда доступны полные данные о метеорологической обстановке, времени активности зон ограничения полётов и опасных зон, а также других факторов, способных привести к частичному закрытию соответствующих участков ВП или аэропортов. На основе этих данных модель позволяет формировать оптимальные альтернативные маршруты в соответствии с заранее разработанными сценариями, что существенно упрощает процесс принятия решений для органа управления ИВП и органов ОВД на этапах подготовки и утверждения плана распределения ВП. Это, в свою очередь, обеспечивает более точное прогнозирование и повышает эффективность стратегического и предтактического планирования, а также даёт возможность оперативно оценивать потенциальные риски при необходимости ремаршрутизации, тем самым снижая вероятность перегрузки отдельных участков ВП. На тактическом уровне, когда ВС уже находятся в полёте, модель динамической ремаршрутизации служит средством быстрой адаптации маршрутов при возникновении непредвиденных изменений условий полётов. В ситуациях ухудшения метеоусловий,

внезапной активации зон ограничения, закрытия воздушных коридоров или появления других факторов, требующих немедленного вмешательства, модель позволяет авиадиспетчерам оперативно определить наиболее подходящие альтернативные маршруты. Использование модели не заменяет профессиональных навыков авиадиспетчеров, но значительно расширяет их возможности, повышая скорость реакции в динамически изменяющихся условиях и способствуя снижению задержек, рисков конфликтных ситуаций и общей нагрузки на ВП.

Эти возможности модели становятся особенно эффективными при интеграции с современными системами ОрВД, которые включают модули мониторинга текущей и прогнозируемой загрузки секторов. В рамках такого замкнутого контура управления система мониторинга выявляет потенциальные проблемные ситуации, а модель динамической ремаршрутизации автоматически предлагает оптимальные альтернативные маршруты, перераспределяя поток в менее загруженные участки ВП. Параллельно модель оптимизации сети маршрутов используется для долгосрочного анализа паттернов загрузки и разработки структурных решений, направленных на устранение хронических точек перегрузки путём модификации конфигурации маршрутной сети. Такой комплексный подход обеспечивает более высокую оперативность, устойчивость и безопасность УВД, позволяя одновременно решать задачи стратегического планирования и тактической адаптации маршрутов.

4.4. Интеграция модели оптимизации сети маршрутов обслуживания воздушного движения и модели динамической ремаршрутизации в автоматизированные системы организации воздушного движения

Разработанные модели, а именно модель оптимизации сети маршрутов ОВД и модель динамической ремаршрутизации, обладают значительным потенциалом

практического применения в автоматизированных системах ОрВД. Модель оптимизации сети маршрутов ОВД применяется преимущественно на стратегическом уровне для совершенствования структуры сети и обеспечения автоматизированного выбора маршрутов минимальной протяжённости при соблюдении эксплуатационных, геометрических и организационных ограничений. Она позволяет заблаговременно анализировать различные сценарии ИВП, например, разработку вариантов обхода зон с ограничениями или обеспечение соответствия маршрутов требованиям к минимальному углу между смежными участками, что делает её ключевым инструментом при проектировании и модернизации сети маршрутов ОВД, а также при формировании стратегических рекомендаций для планирования полётов. Модель динамической ремаршрутизации, изначально предназначенная для оперативного реагирования на изменения воздушной обстановки, демонстрирует высокую эффективность на стратегическом, предтактическом и тактическом уровнях. Возможность быстрого формирования альтернативных маршрутов по множеству прогнозируемых сценариев делает её подходящим инструментом для подготовки «playbook routes» на случай закрытия зон, неблагоприятных метеорологических условий или ожидаемой перегрузки отдельных участков ВП, а на тактическом уровне она обеспечивает оперативное изменение маршрута при отклонениях от плановых условий, снижая нагрузку на диспетчерский персонал за счёт автоматизации поиска допустимых альтернатив.

Интеграция разработанных моделей в современные автоматизированные системы ОрВД создаёт условия для формирования единой интеллектуальной среды поддержки принятия решений. На текущем этапе центры ОрВД используют широкую линейку автоматизированных подсистем: прогнозирования метеоусловий, мониторинга зон ограничений полётов, оценки ПС, а также систем инициирования предупреждений и инструментов ситуационной осведомлённости. Встраивание моделей оптимизации сети маршрутов ОВД и динамической ремаршрутизации в эту

инфраструктуру существенно повышает согласованность функционирования различных компонентов цифровой экосистемы OpВД.

Во-первых, модель оптимизации сети маршрутов ОВД может быть интегрирована с подсистемами стратегического управления ПС и инструментами формирования планов ИВП. Это позволяет преобразовать вычисленную оптимизированную сеть в динамически обновляемую структуру данных, применяемую при выявлении узких мест, выборе оптимальных маршрутизирующих решений и оценке последствий конфигурационных изменений в ВП. Следует отметить, что такая динамическая оптимизация сети маршрутов возможна преимущественно в зонах ВП свободной маршрутизации (Free route airspace – FRA), где маршруты полётов не привязаны к фиксированным трассам, в отличие от традиционного структурированного ВП, где маршруты остаются статичными.

Во-вторых, модель динамической ремаршрутизации может быть связана с системами краткосрочного прогнозирования воздушной обстановки, метеорологическими модулями и подсистемами мониторинга NOTAM. Объединение потоков данных позволяет формировать альтернативные маршруты не только на основе статических ограничений, но и с учётом оперативных прогнозов облачности, зон кучево-дождевой активности, турбулентности или локальных «узких мест» ВП. Это создаёт основу для автоматизированных рекомендаций диспетчерам в реальном времени, снижая задержки и повышая устойчивость функционирования потоков.

В-третьих, интеграция моделей с современными средствами визуализации и ситуационной осведомлённости обеспечивает отображение оптимальных или альтернативных маршрутов непосредственно на рабочих местах авиадиспетчеров. Это повышает прозрачность и обоснованность принимаемых решений, уменьшая когнитивную нагрузку и ускоряя реакцию на отклонения от плановой траектории.

С точки зрения архитектуры, обе модели могут быть реализованы как независимые сервисы в рамках модульной сервис-ориентированной архитектуры, взаимодействующие через единый информационный интерфейс. Такой подход

обеспечивает масштабируемость, совместимость с существующими системами и возможность расширения функциональности без существенной перестройки инфраструктуры ОрВД.

Совместное использование моделей обеспечивает комплексный подход к ОрВД: модель оптимизации сети маршрутов создаёт структурно устойчивую основу для планирования организации и использования ВП, а модель динамической ремаршрутизации обеспечивает гибкую адаптацию как на стадии планирования, так и в процессе выполнения полётов. Интеграция этих решений в единую информационно-аналитическую среду позволяет автоматизированным системам ОрВД поддерживать высокий уровень надёжности, предсказуемости и адаптивности, формируя технологический фундамент для дальнейшего перехода к концепции операций, основанных на траекториях (Trajectory Based Operations, ТВО) и цифровой трансформации процессов УВД.

4.5. Модели оптимизации и ремаршрутизации во взаимодействии с системами организации потоков воздушного движения

Системы ОПВД, такие как европейская система Network Manager или аналогичные национальные решения, выполняют ключевую роль в обеспечении безопасного и эффективного функционирования ВП. Их основная задача заключается в балансировке нагрузки на воздушные маршруты и предотвращении перегрузки отдельных секторов, что позволяет минимизировать задержки рейсов и оптимизировать использование ресурсов. Интеграция разработанных моделей оптимизации и динамической ремаршрутизации с ОПВД-системами открывает возможности для более проактивного и интеллектуального управления воздушными потоками. Модель оптимизации сети маршрутов предоставляет ОПВД-инструментам

информацию о структурной ёмкости маршрутной сети, возможных направлениях перераспределения потоков и прогнозируемых "узких местах". Это позволяет заранее планировать меры по перераспределению трафика и снижению рисков перегрузки. Модель динамической ремаршрутизации расширяет функционал ОПВД за счёт автоматизированного формирования предложений по перенаправлению отдельных рейсов или групп рейсов на альтернативные маршруты. Она учитывает прогнозы перегрузки, изменения метеоусловий, технические ограничения аэропортов и необходимость введения слотов вылета, обеспечивая адаптивность УВД в режиме реального времени.

Совместное применение моделей и ОПВД-систем обеспечивает несколько ключевых преимуществ:

- Проактивное управление потоками – снижение вероятности внезапных перегрузок за счёт раннего перераспределения рейсов.
- Повышение эффективности ИВП – оптимизация маршрутов с учётом структурной ёмкости сети и текущей загрузки секторов.
- Снижение задержек и экономия ресурсов авиакомпаний – более точное планирование времени вылетов и маршрутов позволяет уменьшить топливные расходы и затраты на ожидание в воздухе или на земле.
- Повышение гибкости и адаптивности – модели позволяют оперативно реагировать на внештатные ситуации, включая изменения погоды, закрытие маршрутов или временные ограничения в ВП.
- Поддержка стратегического планирования – данные о загрузке сети и прогнозируемых перегрузках помогают в долгосрочном планировании и развитии маршрутной инфраструктуры.

Таким образом, взаимодействие моделей оптимизации и динамической ремаршрутизации с ОПВД-системами создаёт условия для более сбалансированного, безопасного и эффективного ОрВД, обеспечивая как оперативные, так и стратегические преимущества для всей авиационной системы.

Выводы по главе 4

1. Вариант использования оптимизированной сети маршрутов ОВД был сопоставлен с существующей сетью маршрутов ОВД. Сравнение показало его эффективность: общая протяжённость маршрутов сократилась на 284 км, что в среднем соответствует экономии 1 675,6 кг топлива. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенной модели.

2. Методология применения модели динамической ремаршрутизации в процесс построения данных для «playbook routes» была предложена и верифицирована на конкретном примере.

3. Была проведена детальная оценка возможности практического применения модели оптимизации сети маршрутов ОВД и модели динамической ремаршрутизации для управления, организации и эксплуатации ВП. Анализ показал потенциал использования модели оптимизации маршрутов ОВД на стратегическом этапе, а модели динамической ремаршрутизации на всех трёх этапах: стратегическом, предтактическом и тактическом.

4. Был проведён анализ возможности интеграции модели оптимизации сети маршрутов ОВД и модели динамической ремаршрутизации в автоматизированную систему ОрВД. Анализ показал, что предложенные модели могут быть интегрированы в различные существующие автоматизированные системы ОрВД, такие как системы прогноза погоды, системы планирования полётов, системы обнаружения конфликтов и другие системы.

5. Также представлено применение модели оптимизации сети маршрутов ОВД и модели динамической ремаршрутизации в ОПВД, что демонстрирует их высокий потенциал для практической реализации. Это соответствует рекомендациям ИКАО по единому и согласованному ОрВП и ОПВД.

Заключение

Результаты исследования охватывают два ключевых направления: разработку мер по повышению ПС и эффективности ВП в районах с высокой интенсивностью полётов, а также разработку модели оптимизации сети маршрутов ОВД и модели динамической ремаршрутизации при недоступности основных маршрутов. Представленные модели оптимизации сети маршрутов ОВД и механизмы перенаправления маршрутов были подвергнуты оценке результатов и анализу возможности их применения в реальной практике ОрВД. Моделирование подтвердило надёжность, точность и практическую ценность предложенных технологических и технических решений. Основные выводы исследования включают следующее:

1. Разработанные меры по повышению эффективности ОрВП позволяют существенно улучшить показатели работы ВП РДЦ Хошмина. В частности, предложенный подход к реорганизации структуры секторов ВП обеспечивает высокую практическую применимость и оперативную эффективность, а внедрение современных систем и технических средств ОрВД позволяет повысить БП и ПС. Разработанные меры основаны на научном подходе, учитывающем как актуальные требования и стандарты ИКАО, так и реальные условия эксплуатации ВП.

2. Разработанная модель оптимизации сети маршрутов ОВД и динамической маршрутизации с четко определённой целевой функцией, обоснованными ограничениями и реалистичными допущениями позволяет эффективно решать задачи оптимизации в условиях высокой интенсивности полётов. Результаты моделирования подтверждают достижение поставленных целей и соблюдение ограничений во всех предложенных сценариях.

3. Применение результатов моделирования оптимизации сети маршрутов ОВД позволило разработать варианты планирования ВП и провести детальный

анализ преимуществ и недостатков каждого варианта. На основании данного анализа был выбран наиболее подходящий вариант, который после полной проработки был сопоставлен с существующими маршрутами ОВД. Результаты сравнения показали его эффективность в сокращении общей протяжённости маршрутов ОВД, что способствует снижению расхода топлива и уменьшению воздействия на окружающую среду.

4. Разработанная модель динамической ремаршрутизации демонстрирует высокую эффективность в поиске альтернативных маршрутов к основному маршруту, обеспечивая поддержание требуемого уровня ПС и адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации.

5. Внедрение «Playbook routes» позволяет оптимизировать маршрутизацию, повышать ПС, сокращать задержки и обеспечивать общий уровень БП. Предложен рациональный метод построения «Playbook routes», основанный на использовании модели динамической ремаршрутизации, подробно описанный и проиллюстрированный на примере конкретного маршрута.

6. Проведен детальный анализ практического применения модели оптимизации сети маршрутов ОВД и динамической ремаршрутизации, который показал возможность их эффективного использования при организации, управлении и проектировании ВП, интеграции с автоматизированными системами ОрВД и другими сопутствующими системами, а также при ОПВД. Модели обладают высокой гибкостью и могут применяться для различных конфигураций ВП за счёт изменения исходных координатных данных ППМ.

7. Разработанный метод позволяет перейти от традиционных маршрутов ОВД к маршрутам зональной навигации, создавать временные маршруты и зоны ВП со свободной маршрутизацией, что способствует внедрению более эффективных маршрутов и соответствует современным тенденциям совершенствования аэронавигационного обслуживания.

Список сокращений

БП – безопасность полётов

ВД – воздушное движение

ВС – воздушное судно

ВОРЛ – Вторичный обзорный радиолокатор

ВП – воздушное пространство

ВПП – взлётно-посадочная полоса

ГА – гражданская авиация

ЗОП – Зона ограничения полетов

ИАТА – Международная ассоциация воздушного транспорта

ИВП – использование воздушного пространства

ИКАО – Международная организация гражданской авиации

ОВД – обслуживание воздушного движения

ОПВД – организация потоков воздушного движения

ОрВД – организация воздушного движения

ОрВП – организация воздушного пространства

ПКС – потенциальные конфликтные ситуации

ППМ – поворотный пункт маршрута

ПС – пропускная способность

РД – рулѐжная дорожка

РДЦ – районный диспетчерский центр

РПИ – район полѐтной информации

РФ – Российская Федерация

ТСН – Тан Сон Нхат

УВД – управление воздушным движением

ЭП – эшелон полѐта

A-CDM – совместное принятие решений в аэропорту
ADS-B – Автоматическое зависимое наблюдение - вещательное
AMAN – менеджер прибытия
CCO – полёт в режиме постоянного набора высоты
CDO – полёт в режиме постоянного снижения
CNS – связь, навигация и наблюдение
CTR – диспетчерская зона
DMAN – менеджер отправления
DME – Дальномерное оборудование
FRA – воздушное пространство свободной маршрутизации
GNSS – глобальная навигационная спутниковая система
IAP – процедура захода на посадку по приборам
MLAT – система многопозиционного приема
NDB – ненаправленный радиомаяк
PBN – навигация, основанная на характеристиках
RNAV – зональная навигация
RNP – требуемые навигационные характеристики
RVSM – сокращённые минимумы вертикального эшелонирования
SID – Стандартный маршрут вылета по приборам
STAR – Стандартный маршрут прибытия по приборам
TMA – терминальная зона маневрирования
TWR – аэродромный диспетчерский пункт
UTC – универсальное глобальное время
VATM – Вьетнамская корпорация организации воздушного движения
VOR – всенаправленный ОВЧ-радиомаяк
WAM – Широкозонные мультилатерационные системы навигации

Список литературы

1. **ИКАО.** A42-WP/556, Economic commission. State of the industry and outlook for airport traffic. 29 июля 2025. – 4 с. URL:
https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_556_en.pdf
(Дата обращения: 6.12.2025).
2. **ИАТА.** Annual review 2025. Delhi, India, 1 июня 2025 г. URL:
<https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2025.pdf> (Дата обращения: 6.12.2025).
3. Основы теории управления воздушным движением : учеб. пособие / сост. В. А. Карнаухов. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2010. – 78 с.
4. **SESAR.** European ATM Master Plan, 2025. URL:
<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/SESAR%20Master%20Plan%202025.pdf> (Дата обращения: 5.12.2025).
5. **ИКАО.** Air traffic management automation system implementation and operations guidance document, June 2025. URL:
<https://www.icao.int/sites/default/files/APAC/Documents/ATMAS-Implementation-and-Operations-Guidance-Document-Edition-1.5.pdf> (Дата обращения: 5.12.2025).
6. **Бызов И.Л.** Реорганизация структуры воздушного пространства секторов рц Екатеринбургского центра ЕС ОРВД – Текст : непосредственный // «Глобализация науки и техники в условиях кризиса»: материалы Международной научнопрактической конференции, Ростов-на-Дону, 15 марта 2021 г. : С. 74-78.
7. **Hirabayashi H., Brown M., Takeichi N.** (2022). Feasibility Study of Free Route Airspace over the North Pacific. Journal of Air Transportation, vol. 30, iss. 2. DOI: 10.2514/1.D0291
8. **Liang H., Zhang S., Kong J.** (2023). Study on Characteristics and Invulnerability of Airspace Sector Network Using Complex Network Theory. Aerospace, vol. 10, iss. 3. DOI: 10.3390/aerospace10030225

9. **Zhu D., Chen Z., Xie X., Chen, J.** (2023). Discretization Method to Improve the Efficiency of Complex Airspace Operation. *Aerospace*, vol 10, iss. 9. DOI: 10.3390/aerospace10090780
10. **Максимова С.Е.** Рискоориентированное геоинформационное моделирование воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2025. Т. 28, № 1, С. 39-52. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-39-52
11. **Неретин Е.С., Нгуен Т.Л.Ф., Нгуен Н.Х.К.** Анализ взаимодействия человека и влияния погоды на прогнозирование траектории самолета с помощью искусственного интеллекта – Текст : непосредственный // «2022 XIX Научно-техническая конференция по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»: материалы Международной научнопрактической конференции, Москва, 14-15 апреля 2022 г. : М.: МГТУ ГА, 2022. С. 85-89.
12. **Nguyen N.H.Q., Luong C.H., Truong H.H.** (2019). Plan for reducing ATS Congestion in sectors in ACC HCM airspace. *Journal of the Vietnam Aviation Academy*. pp. 40–45.
13. **Нгуен Т. Л. Ф., Неретин Е.С., Нгуен Н. М.** Разработка методики идентификации и разрешения конфликтных ситуаций при оперативном планировании четырехмерной траектории полета // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2024. № 2, С. 77-95. DOI: 10.51955/2312-1327_2024_2_77
14. **Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н.** Предложения по проектированию организации воздушного пространства секторов ОВД районного диспетчерского центра Хошима с целью повышения его пропускной способности // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2024. Т. 27, № 3, С. 50-66. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-50-66
15. **Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н., Малыгин В.Б.** Математическая модель и применение алгоритма A-star для оптимизации маршрутов ОВД в ВП районного диспетчерского центра Хошима // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2025. № 1, С. 64-85. DOI: 10.51955/2312-1327_2025_1_64

16. **Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н., Субботин Р.А.** Оптимизация сети маршрутов обслуживания воздушного движения с ограничением углов пересечения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 3, С. 47-62. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-3-47-62
17. **Nguyen N.H.Q., Vu T.H.A., Le H.M., Nguyen M.P., Le T.T.T., Nguyen T.T.T., Nguyen N.N.Y.** (2025). Optimizing airway network efficiency with the A-star algorithm: A case study of Ho Chi Minh FIR. *Aviation*, vol. 29, iss. 2, pp. 104-117. DOI: 10.3846/aviation.2025.23635
18. **Nguyen N.H.Q., Nguyen N.Q.N., Nechaev V.N.** (2025). A Robust Multi-objective Optimization Model for Dynamic Rerouting in Case of Destination Airport Unavailability. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 129, pp. 169-190. DOI: 10.20858/sjsutst.2025.129.10
19. **Нгуен Н.Х.К.** Современные технологии и методы организации воздушного движения в воздушном пространстве Вьетнама // «2023 XVII Международная научно-теоретическая конференция «Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы»: Сборник научных статей. Выпуск 13, Москва, 16 ноября 2023 г. : М.: МГТУ ГА, 2023. С. 385-390.
20. **Нгуен Н.Х.К., Чау. К., Нечаев В.Н.** Создание программы менеджера прибытия/отправления для поддержки организации воздушного движения в аэропорту Тан Сон Нхат // «XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2023»: материалы Международной научнопрактической конференции, Иркутск, 7-8 декабря 2023 г. Том 1. : М.: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2023. С. 179-188.
21. **Nguyen N.H.Q., Vu T.H.A., Le H.M., Nguyen M.P., Le T.T.T., Nguyen T.T.T., Nguyen N.N.Y.** “Optimize the airway network in Ho Chi Minh Flight Information Region using the A-star algorithm”. *International Symposium on Aircraft Technology, MRO & Operations (ISATECH)*. Hochiminh city, Vietnam, August 27 – 29, 2024.

22. Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н., Малыгин В.Б., Разов В. Г. Оценка конфликтности структуры воздушного пространства при помощи моделирования районного диспетчерского центра Хошимина // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 49, С. 77-87.
23. Nguyen N.H.Q., Le. M.H., Dinh. T.B., Nguyen P.K., Nguyen. T.T., Le T.T., Nguyen V.T.S., Nguyen H.V. “Optimizing the airspace capacity in the Ho Chi Minh Flight Information Region based on the WOTN model”. International Symposium on Aircraft Technology, MRO & Operations (ISATECH). Hochiminh city, Vietnam, August 27 – 29, 2024.
24. Nguyen N.H.Q., Pham T.H., Tran T.M.D., Nguyen H.H.N., Nguelyn A.T., Le N.T.T., Tran G.B. (2025). Application of graph neural networks in optimizing flight time for the Ho Chi Minh - Hanoi route. Journal of Aviation Science & Technology, 2024. URL: <https://scholar.dlu.edu.vn/thuvienso/bitstream/DLU123456789/273201/1/108196-2605-219062-1-10-20250212.pdf> (Дата обращения: 24.11.2025).
25. Nguyen N.H.Q., Le. M.H., Dinh. T.B., Nguyen P.K., Nguyen. T.T., Le T.T., Nguyen V.T.S., Nguyen H.V. (2025). Application of the wind-optimal track network in optimizing airspace capacity in Ho Chi Minh flight information region. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, vol. 127, pp. 207-222. DOI: 10.20858/sjsutst.2025.127.12
26. ИКАО. Приложение 11. Обслуживание воздушного движения. Издание пятнадцатое. Канада, Монреаль, 2018. – 142 с.
27. ИКАО. ДОК 9854. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД, Глава 2, Канада, Монреаль, 2005. – 93 с.
28. ИКАО. ДОК 9992. Руководство по использованию навигации, основанной на характеристиках (PBN), при построении воздушного пространства, Издание первое, Канада, Монреаль, 2013. – 56 с.
29. Горбенко В.М. Методика автоматизированного проектирования ОрВП в регионе ОВД // Госкорпорация по ОрВД, Москва, 2008. С. 9.

30. ИКАО. ДОК 9906. Руководство по обеспечению качества при разработке схем полётов, Том 1: Система обеспечения качества при разработке схем полетов, Издание первое, Канада, Монреаль, 2009. – 66 с.
31. ИКАО. ДОК 8168. Правила аэронавигационного обслуживания: производство полётов ВС, Том 1: Правила производства полётов. Издание шестое, Канада, Монреаль, 2018. – 236 с.
32. Об изменениях в сети маршрутов ОВД в зоне ответственности ряда РЦ ЕС ОрВД. [Электронный ресурс]. – 2021. Режим доступа: https://gkovd.ru/news/novosti-goskorporatsii/ob-izmeneniyakh-v-seti-marshrutov-ovd-v-zone-otvetstvennosti-ryada-rts-es-orvd/?sphrase_id=208310
33. Состоялось международное совещание провайдеров АНО по кроссполярным и трансвосточным маршрутам. [Электронный ресурс]. – 2021. Режим доступа: <https://gkovd.ru/news/novosti-goskorporatsii/mezhdunarodnoe-soveshchanie-provayderov-ano-po-krosspolyarnym-i-transvostochnym-marshrutam/>
34. Тюрин Владимир (2020). НСВП. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aopa.ru/assets/files/NSVP-AOPA.pdf> (Дата обращения: 4.9.2025).
35. Воздушное пространство в небе над европейской частью России перешло на новую структуру [Электронный ресурс]. – 2021. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9807> (Дата обращения: 4.9.2025).
36. ANI/WG/PBN/TF/OPT-WP/02, Optimization of the CAR Region Airspace Meeting NAM/CAR Air Navigation Implementation Working Group (ANI/WG) Performance-Based Navigation (PBN) Airspace Concept Task Force (ANI/WG/PBN/TF/OPT) Online, 20 – 23 October 2020. URL: <https://www2023.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2020/PBNTFOPT/PBNTF-OPT-WP02.pdf> (Дата обращения: 24.11.2025).
37. SESAR. Framework document European Route Network Improvement Plan – Part 1, Airspace Design Methodology Guidelines - General Principles and Technical Specifications for Airspace Design, 08 April, 2021. URL:

- <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-04/eurocontrol-ernip-part1.pdf> (Дата обращения: 26.2.2025).
38. ИКАО. The AFI planning and implementation regional group (APIRG), Fourth Meeting of the APIRG Airspace and Aerodrome Operations Sub-Group (AAO SG/4), Virtual Meeting. Canada, Montreal, 16 - 18 August 2021. URL: <https://www2023.icao.int/ESAF/Pages/AAO-SG4-2021.aspx> (Дата обращения: 6.2.2025).
39. ИКАО. Asia/Pacific region ATS route catalogue. Version 21.2. December, 2022. URL: <https://www2023.icao.int/APAC/Documents/edocs/APAC%20Region%20ATS%20Route%20Catalogue%20-%202021.2.pdf> (Дата обращения: 6.2.2025).
40. ИКАО. Asia-Pacific regional aviation safety plan 2023 - 2025. March, 2023. URL: <https://www2023.icao.int/safety/GASP/GASP%20Library/Regional%20aviation%20safety%20plans/AP-RASP%202023-2025.pdf> (Дата обращения: 6.2.2025).
41. ИКАО. ДОК 9971. Руководство по совместной организации потоков воздушного движения, добавление II-C, Издание третье, Канада, Монреаль, 2018. – 250 с.
42. Eurocontrol. Pessimistic Sector Capacity Estimation, EEC Note No. 21/03, 11/2003. URL: <https://www.eurocontrol.int/node/9925> (Дата обращения: 6.2.2025).
43. Sân bay Tân Sơn Nhất quá tải, logistics Việt Nam cao so với khu vực... TP.HCM giải quyết ra sao? 18 September, 2024. URL: <https://tuoitre.vn/san-bay-tan-son-nhat-qua-tai-logistics-viet-nam-cao-so-voi-khu-vuc-tp-hcm-giai-quyet-ra-sao-20240918102954621.htm> (Дата обращения: 19.3.2025).
44. Sân bay Tân Sơn Nhất quá tải, 24 January, 2025. URL: <https://www.sggp.org.vn/san-bay-tan-son-nhat-qua-tai-post779449.html> (Дата обращения: 19.3.2025).
45. Trình Thủ tướng xây ga hành khách T3 TSN gần 11.000 tỷ đồng, 6 December, 2019. URL: <https://dantri.com.vn/kinh-doanh/trinh-thu-tuong-xay-ga-hanh-khach-t-3-tan-son-nhat-gan-11000-ty-dong-20191205233817084.htm> (Дата обращения: 6.3.2025).
46. Радиолокационные системы ВС и АП: пособие по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы. / Э.А. Болелов, Э.А. Лутин. – Москва: МГТУ ГА, 2016. – 26 с.

47. ИКАО. **Circular 326**. Оценка наблюдения с использованием систем ADS-B и мультilaterации в целях обеспечения обслуживания воздушного движения и рекомендации по их внедрению, Канада, Монреаль, 2013. – 46 с.
48. **Монаков А.А., Миролюбов А.М.**, Компенсация ошибок оценивания местоположения, вызванных тропосферным распространением радиоволн, в широкозонных мультilaterационных системах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6, С. 59–69. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-59-69
49. **VATM**. VATM and JRC successfully completed the MLAT cooperation program at Phu Quoc international airport. 2022. URL: <https://vatm.vn/vatm-and-jrc-successfully-completed-the-mlat-cooperation-program-at-phu-quoc-international-airport-n6629.html> (Дата обращения: 6.2.2025).
50. Great Circle Distance Formula. [Электронный ресурс]. – 2023. Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/great-circle-distance-formula>
51. **Гаракоев А. М., Гладышев А. И.** Формирование программных траекторий движения летательного аппарата при аэрогеофизической съемке // Проблемы управления. 2023. № 4, С. 38-47. DOI 10.25728/ru.2023.4.4
52. **Самохина М. А., Галяев А. А.** Построение карты локально оптимальных путей управляемого подвижного объекта в конфликтной среде при переходе из точки в точку // Проблемы управления. 2024. № 1, С. 90-102. DOI 10.25728/cs.2024.1.8
53. **Храмов А. А.** Оптимизация траекторного движения первой ступени авиационно-космической системы // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1, С. 80-92. DOI 10.18287/2541-7533-2024-23-1-80-92.
54. **Ekrami Kivaj A., Basohbat Novinzadeh A., Pazooki F.** (2023). Spacecraft reentry trajectory optimization by heuristic optimization methods and optimal control theory. International Journal of Dynamics and Control, vol. 11: pp. 1132-1141. DOI: 10.1007/s40435-022-01033-0

- 55. Wang X. W, Peng H. J, Liu J. [et al.].** (2022). Optimal control based coordinated taxiing path planning and tracking for multiple carrier aircraft on flight deck. *Defence Technology*, vol. 18, iss. 2, pp. 238-248. DOI: 10.1016/j.dt.2020.11.013.
- 56. Zwick M., Gerdts M., Stütz P.** (2023). Sensor-Model-Based Trajectory Optimization for UAVs to Enhance Detection Performance: An Optimal Control Approach and Experimental Results. *Sensors*, vol. 23, iss. 2, pp. 664. DOI: 10.3390/s23020664
- 57. Костин А. С., Майоров Н. Н.** Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2023. Т. 15, № 3, С. 524-536. DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.
- 58. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьева Н.Г., Арефьев Р.О.** Алгоритмы оптимизации траекторий воздушных судов при гибкой маршрутизации // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5, С.19-31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31
- 59. Blasi L., D'amato E., Notaro I., Raspaolo G.** (2023). Clothoid-Based Path Planning for a Formation of Fixed-Wing UAVs. *Electronics*, vol. 12, iss. 10. pp. 2204. DOI: 10.3390/electronics12102204
- 60. Ntakolia Ch. Lyridis. D. V.** (2022). A n-D ant colony optimization with fuzzy logic for air traffic flow management. *Operational Research*, vol. 22, iss. 5. pp. 5035-5053. DOI: 10.1007/s12351-021-00686-7
- 61. Pang Y., Zhao X., Hu J., Yan H., Liu Y.** (2022). Bayesian Spatio-Temporal graph transformer network (B-STAR) for multi-aircraft trajectory prediction. *Knowledge-Based Systems*, vol. 249. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.108998
- 62. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C.** Introduction to Algorithms. – 4th ed. – Cambridge: The MIT Press, 2022. – 1312 p. – ISBN 978-0-262-04630-5.
- 63. Нейронные сети в PyTorch : монография // Ф.М. Гафаров, А.Ф. Гилемзянов. –** Казань: Казанский федеральный университет, 2024. – 106 с.

64. **Laparra D. M.** Pathfinding algorithms in graphs and applications. – Universitat de Barcelona, 2019. – 39 p.
65. **Jurkiewicz P.** Empirical Time Complexity of Generic Dijkstra Algorithm / P. Jurkiewicz, E. Biernacka, J. Domżał, R. Wójcik // IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Bordeaux, France, 2021. pp. 594-598.
66. **Nazarifard M.** Efficient implementation of the Bellman-Ford algorithm on GPU / M. Nazarifard, D. Bahrepour // IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation. Tehran, Iran, 2017. pp. 773-778. DOI: 10.1109/KBEI.2017.8324901
67. **Khemani B., Patil S., Kotecha K.** (2024). A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions. *Journal of Big Data*, vol. 11, iss 18. DOI: 10.1186/s40537-023-00876-4
68. **Нурлыбаев М.А., Алмазхан Н.А.** Применение алгоритмов поиска пути для контроля беспилотных летательных аппаратов аэродромного базирования для предотвращения столкновений // Материалы конференции «Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем», Санкт-Петербург, 22 декабря, 2022. – С. 23–26
69. **Yoo Y. D., Moon J. H.** (2025). Study on A-Star Algorithm-Based 3D Path Optimization Method Considering Density of Obstacles. *Aerospace*, vol. 12, iss. 2. DOI: 10.3390/aerospace12020085
70. **Zhang H., Tao Y., Zhu W.** (2023). Global Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Improved A-Star Algorithm. *Sensors*, vol. 23 iss. 14. DOI: 10.3390/s23146647
71. **Chatzisavvas A., Dossis M., Dasygenis M.** (2024). Optimizing Mobile Robot Navigation Based on A-Star Algorithm for Obstacle Avoidance in Smart Agriculture. *Electronics*, vol 13, iss. 11. DOI: 10.3390/electronics13112057
72. **Kabir R., Watanobe Y., Islam M. R., Naruse K.** (2024). Enhanced Robot Motion Block of A-Star Algorithm for Robotic Path Planning. *Sensors*, vol. 24, iss. 5. DOI: 10.3390/s24051422

73. **Farid G., Cocuzza S., Younas T., Razzaqi A. A., Wattoo W. A., Cannella F., Mo, H.** (2022). Modified A-Star Approach to Plan the Motion of a Quadrotor UAV in Three-Dimensional Obstacle-Cluttered Environment. *Applied Sciences*, vol 12, iss. 12. DOI: 10.3390/app12125791
74. **Li J.** A Method of UAV Navigation Planning Based on ROS and Improved A-star Algorithm / J. Li, X. Xiong and Y. Yang // 2023 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Yibin, China, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/SAFEPROCESS58597.2023.10295735.
75. **Hart P. E.** A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths / P.E. Hart, N.J. Nilsson, B. Raphael // *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. vol. 4, iss. 2, pp. 100–107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136
76. **Van Rossum G., Drake F.L.** Python 3 Reference Manual. – CreateSpace. – Scotts Valley, CA, USA, 2009. – 242 p.
77. OAG Aviation Worldwide Limited. The busiest flight routes of 2024. 2024. URL: <https://www.oag.com/busiest-routes-world-2024> (Дата обращения: 5.3.2025).
78. **ИКАО. ДОК 9613.** Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN), Издание пятое, Канада, Монреаль, 2023. – 468 с.
79. **Xu Y., Dalmau R., Melgosa M., Montlaur. A., Prats. X.** (2020). A framework for collaborative air traffic flow management minimizing costs for airspace users: Enabling trajectory options and flexible pre-tactical delay management. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 134, pp. 229-255. DOI: 10.1016/j.trb.2020.02.012
80. **Yang S., Yan Y., Chen P.** (2021). Robust Optimization Models for Flight Rerouting. *International Journal of Computational Methods*, vol. 18, iss. 5. DOI: 10.1142/S0219876220400010
81. **Bongo M.F.** A Robust Optimisation Formulation for Post-departure Rerouting Problem / M.F. Bongo, C.L. Sy // 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 2020. pp. 509-513. DOI: 10.1109/IEEM45057.2020.9309827

- 82. Rosenow J., Lindner M., Scheiderer J.** (2021). Advanced Flight Planning and the Benefit of In-Flight Aircraft Trajectory Optimization. *Sustainability*, vol. 13, iss. 3, pp. 1383. DOI: 10.3390/su13031383
- 83. Махонин А.А., Глазков В.Паль-Духэйдахави ., М.А.Л., Аль-Карави Р.Д.С.** Оптимизация полета малого беспилотного летательного аппарата в статическом режиме // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. № 2, С. 16-22. DOI: 0.24412/2541-9269-2021-2-16-22
- 84. Огородников О. В.** Разработка и исследование алгоритма, основанного на методе «Direct collocation», для оптимизации траектории набора высоты и скорости маневренного самолета // «15-я Международная конференция "Управление развитием крупномасштабных систем»: материалы Международной научнопрактической конференции, Москва, 2022 г. С. 1156-1160. DOI: 10.25728/mlsd.2022.1156
- 85. Galindo K. -C.** A Modeling Relative Trajectory Costs for Airborne Trajectory Reroutes using Trajectory Option Sets / K. -C. Galindo, P. U. Lee, C. L. Brasil // IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), USA, 2021, 1-10. DOI: 10.1109/DASC52595.2021.9594370
- 86. Enea G., McPartland M., DePascale S., Johnson D., Eberle D. Bassett P.** (2023). Impacts and Mitigations of Convective Weather on Trajectory Based Operation Automation. AIAA. Session: Safety and Reliability. DOI: 10.2514/6.2023-3551
- 87. Teutsch J.** On the Impact of UAS Contingencies on ATC Operations in Shared Airspace / J. Teutsch, C. Petersen, G. Schwoch, T.J. Lieb, T. Bos, R. Zon // Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), USA, 2023. pp. 1-15. DOI: 10.1109/ICNS58246.2023.10124297
- 88. Edwards, T. E., Wolter C., Bridges W., Evans M., Keeler J., Hayashi M.** (2021). Bow Tie Analysis of the Effects of Unmanned Aircraft on Air Traffic Control. AIAA 2021-2334. Session: UAS/UAM Traffic Management. DOI: 10.2514/6.2021-2334

- 89. Teomitzi H. E.** Concept and Requirements for an Integrated Contingency Management Framework in UAS Missions / H.E. Teomitzi, J. R. Schmidt J. R. // 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky, MT, USA, 2021. pp. 1-17. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438458
- 90. ИАТА.** Global Outlook for Air Transport: Highly Resilient, Less Robust, June 2023. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport----june-2023/> (Дата обращения: 18.3.2025).
- 91. Eurocontrol.** Network Manager Annual Report 2023, 12 September, 2024. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/network-manager-annual-report-2023> (Дата обращения: 18.3.2025).
- 92. ИАТА.** Global Outlook for Air Transport: A local sweet spot, December 2023. URL: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---december-2023---report/> (Дата обращения: 18.3.2025).
- 93. Helton D., Ging T. A.** (2018). Air Traffic Management Technology Demonstration – 3 (ATD-3) Dynamic Weather Routes Domestic En Route Concept of Operations Synopsis Version 1.0. NASA Center for AeroSpace Information. 34 pp.
- 94. Eurocontrol.** Network Manager Annual Report 2023. The EUROCONTROL Maastricht Upper Area Control Centre (MUAC) and Reims ACC implement major airspace boundary redesign, 23 January 2025. URL: <https://www.eurocontrol.int/press-release/eurocontrol-maastricht-upper-area-control-centre-muac-and-reims-acc-implement-major> (Дата обращения: 18.3.2025).
- 95. He C., Wan Y., Xie J.** (2022). Automated Playbook for UAV Traffic Management Based on Spatiotemporal Scenario Data. Unmanned Systems, vol. 10, no. 3, pp. 255-271. DOI: 10.1142/S2301385022500145
- 96. VATM.** Over 25,000 flights controlled by VATM during the 2025 Lunar New Year holiday. 4 февраля 2025 года.. URL: <https://vatm.vn/over-25000-flights-controlled-by-vatm-during-the-2025-lunar-new-year-holiday.html> (Дата обращения: 4.9.2025).

97. **Anh Tu.** Sân bay Tân Sơn Nhất đón 4 triệu lượt khách dịp Tết 2025, 14 февраля 2025 года. URL: <https://laodong.vn/giao-thong/san-bay-tan-son-nhat-don-4-trieu-luot-khach-dip-tet-2025-1463240.ldo> (Дата обращения: 4.9.2025).
98. **ИКАО.** Эффективность и окружающая среда. Москва, Российская Федерация, 29-30 мая 2018. URL: https://www2023.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/ICAO%20EUR%20Regional%20Performance%20Framework%20Workshops/ICAO%20Regional%20Performance%20Framework%20Workshop%20RUSSIAN%20FEDERATION/ICAO%20EUR%20REG%20PERF%20WKSHP%20RUS%20PPT07_RU.pdf (Дата обращения: 4.12.2025).
99. **Kumar Supraja N. and Rutherford D.** (2024). Lifetime emissions from aircraft under a net-zero carbon budget. International Council On Clean Transportation, July 2024. URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/07/ID-188-%E2%80%93-Committed-emissions_wp_final.pdf (Дата обращения: 4.12.2025).
100. **ИКАО.** Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). April 2024. URL: https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/CORSIA_FAQs_Apr2024.pdf (Дата обращения: 4.12.2025).

**Приложение А: Информация о расположении и типах зон ППМ, используемых
для задачи оптимизации сети маршрутов ОВД**

ППМ	Широта	Долгота	зона	ППМ	Широта	Долгота	зона
ADBOP	8,500	104,083	море	MIGUG	15,273	114,000	море
AGSAM	11,472	112,588	море	MIMUX	11,305	111,103	море
AGSIS	11,022	108,831	побережье	MOXEB	10,899	106,463	земля
AKMON	8,215	110,218	море	MOXON	8,825	109,355	море
ALDAS	10,948	112,205	море	MUGAN	12,367	111,872	море
ANHOA	9,787	105,908	земля	MULAD	12,548	107,575	земля
ANINA	13,983	107,417	земля	MUMGA	14,000	108,154	земля
ANOKI	12,367	113,250	море	NHATA	12,226	109,201	побережье
ARESI	13,973	114,450	море	NITOM	12,742	110,640	море
ASEBO	10,332	107,290	побережье	NIXIV	9,393	106,634	побережье
ASUKU	15,607	109,244	море	NOBID	13,312	108,582	земля
ATGAS	10,405	105,517	земля	NUMDI	10,445	103,776	побережье
ATVIT	12,141	109,496	побережье	ONEBI	11,938	108,309	земля
BANSU	14,286	108,160	земля	OSIXA	9,522	109,844	море
BIBAN	8,500	105,000	побережье	OSOTA	10,552	104,264	побережье
BIGBO	16,489	107,627	побережье	PANDI	11,635	114,000	море
BINKU	16,560	108,973	море	PAPRA	15,767	107,183	земля
BITIS	10,266	106,248	земля	PATMA	12,336	107,810	земля
BITOD	7,257	104,118	море	PATNO	15,965	107,885	земля
BODOD	9,639	106,858	море	PHULU	16,695	107,889	побережье
BOMPA	14,333	107,400	земля	POTIX	10,235	105,617	земля
BUKMA	10,847	107,031	земля	RUNOP	11,088	106,638	земля
BUNTA	16,833	109,395	море	RUTIT	10,454	107,758	побережье
CAHEO	16,536	107,965	побережье	SADAS	13,320	107,829	земля
CONDA	8,957	106,475	побережье	SADIN	15,080	108,177	земля
DADEM	10,896	105,228	земля	SAMAP	9,788	109,253	море

DADEN	13,999	107,844	земля	SAMOG	8,002	103,240	море
DAGAG	9,463	108,442	море	SAPEN	11,020	106,183	земля
DAMEL	13,978	111,510	море	SOSPA	11,834	108,641	земля
DAMVO	11,108	109,545	море	SUDUN	9,993	108,796	море
DONDA	14,703	112,022	море	TANNA	15,903	107,659	земля
DONXO	11,423	106,952	земля	TATIM	14,981	108,020	земля
DOVIN	11,917	108,108	земля	TORED	16,464	106,676	земля
DOXAR	12,367	110,378	море	TRABE	16,896	107,427	побережье
DUDIS	7,000	106,810	море	TULTU	9,683	106,898	море
ELSAS	10,137	107,548	море	TUNPO	10,062	104,589	побережье
ENGIM	13,341	108,139	земля	UDOSI	9,547	111,181	море
ENPAS	10,400	106,111	земля	VEPAM	13,967	110,000	море
ENRIN	11,191	107,324	земля	VEPKI	9,106	106,374	море
ESDOB	10,889	106,964	земля	VEPMA	10,933	107,672	земля
ESPOB	7,000	105,555	море	VETOM	11,233	107,608	земля
EXOTO	15,358	111,050	море	VIDEN	17,021	107,366	побережье
GONLY	13,667	107,500	земля	VIGEN	7,996	105,369	море
HAMIN	17,130	107,678	море	VILOT	15,039	108,112	земля
IBUNU	11,669	108,868	побережье	VIMUT	13,963	109,521	побережье
IGARI	6,937	103,585	море	XAQUA	14,919	108,102	земля
IPRIX	7,000	104,132	море	XOBAV	10,140	106,643	побережье
ITBAM	16,667	109,602	море	XONAN	9,245	102,838	море
KADUM	11,357	107,059	земля	AC	10,939	107,188	земля
KAMGO	13,288	109,101	побережье	BMT	12,666	108,123	земля
KANGU	16,354	108,665	море	QL	9,176	105,177	земля
KARAN	12,649	109,157	побережье	CRA	11,994	109,220	побережье
KISAN	10,539	104,675	побережье	TRN	10,083	105,706	земля
KONCO	17,000	107,187	побережье	CQ	15,412	108,704	побережье
KUMUN	14,971	108,808	побережье	CN	8,733	106,626	побережье
LATOM	14,879	107,844	земля	DAN	16,053	108,198	побережье
LEDUP	10,776	107,147	земля	LKH	11,754	108,355	земля

LITAM	8,994	106,702	побережье	PTH	10,928	108,072	побережье
LOSON	10,493	107,076	побережье	HUE	16,402	107,702	побережье
MAPNO	10,218	110,335	море	PCA	13,957	109,043	побережье
MATGI	10,896	107,647	побережье	PQU	10,165	104,039	побережье
MELAS	7,088	108,153	море	PLK	14,006	108,024	земля
MESOX	13,980	113,045	море	RG	9,959	105,133	побережье

Примечание: Широта и долгота указаны в десятичных градусах с точностью до трёх знаков после запятой, что обеспечивает высокую точность позиционирования относительно реального местоположения.

**Приложение Б: Информация о бесполётных зонах, используемых в сценарии 2
при развитии модели оптимизации сети маршрутов ОВД**

- Многоугольная бесполётная зона

Название	Широта	Долгота	Нижний предел	Верхний предел
Стрелковая зона МАУ ТАО (VVD32)	10,861	107,442	От поверхности	Высота неизвестна
	10,766	107,542		
	10,789	107,683		
	10,654	107,683		
	10,659	107,506		
	10,764	107,405		
	10,850	107,426		
Запретная зона Хошима (VVP4)	10,797	106,639	От поверхности	3000 м
	10,822	106,744		
	10,753	106,706		
	10,729	106,643		
Запретная зона Дананга (VVP3)	16,083	108,228	От поверхности	1500 м
	16,047	108,219		
	16,047	108,207		
	16,072	108,207		
	16,083	108,228		
Зона ограничения полётов Бьенхоа (VVR19)	11,211	106,091	От поверхности	Высота неизвестна
	11,211	106,091		
	11,245	106,118		
	11,245	106,118		
	11,278	106,146		
	11,309	106,177		
	11,309	106,177		

	11,337	106,209		
	11,337	106,209		
	11,364	106,243		
	11,389	106,279		
	11,389	106,279		
	11,411	106,317		
	11,411	106,317		
	11,430	106,355		
	11,448	106,395		
	11,448	106,395		
	11,462	106,436		
	11,475	106,478		
	11,475	106,478		
	11,484	106,521		
	11,484	106,521		
	11,491	106,564		
	11,495	106,607		
	11,495	106,607		
	11,496	106,651		
	11,496	106,651		
	11,496	106,651		
	11,495	106,694		
	11,495	106,694		
	11,491	106,738		
	11,491	106,738		
	11,484	106,781		
	11,475	106,823		
	11,475	106,823		
	11,462	106,865		
	11,448	106,906		
	11,448	106,906		

	11,430	106,946		
	11,430	106,946		
	11,411	106,985		
	11,389	107,022		
	11,389	107,022		
	11,364	107,058		
	11,364	107,058		
	11,337	107,092		
	11,309	107,125		
	11,309	107,125		
	11,278	107,155		
	11,245	107,184		
	10,933	107,033		
	10,933	106,733		
Полигон для стрельбы региона 5 (VVD76)	9,900	103,984	От поверхности	Высота неизвестна
	9,900	104,150		
	9,733	104,150		
	9,733	103,984		
Стрелковый полигон Кьенжанг (VVD75)	10,023	104,025	От поверхности	Высота неизвестна
	10,023	104,035		
	10,017	104,039		
	10,017	104,026		
Стрелковый полигон района 2.2 (VVD74)	10,166	108,817	От поверхности	Высота неизвестна
	10,166	108,984		
	10,000	108,984		
	10,000	108,817		
Стрелковый полигон региона 2 (VVD70)	10,697	106,922	От поверхности	Высота неизвестна
	10,697	106,924		
	10,697	106,924		
	10,696	106,922		
Стрелковый полигон В	11,870	109,254	От	Высота неизвестна

(VVD65)	11,869	109,254	поверхности	
	11,869	109,251		
	11,870	109,251		
Национальный стрелковый полигон ТВ5 (VVD64)	11,957	109,256	От поверхности	Высота неизвестна
	11,963	109,256		
	11,963	109,267		
	11,957	109,267		
Национальный стрелковый полигон ТВ5 (VVD63)	11,904	109,252	От поверхности	Высота неизвестна
	11,914	109,268		
	11,880	109,269		
	11,870	109,252		
Стрелковый полигон региона 4 (VVD62)	12,017	109,180	От поверхности	Высота неизвестна
	12,019	109,178		
	12,022	109,181		
	12,017	109,183		
Военная учебная зона на море (VVD60)	13,833	109,309	200 м	8000 м
	13,833	109,392		
	13,950	109,409		
	13,933	109,309		
Стрелковый полигон ТВ- 2 (VDD58)	13,986	109,029	От поверхности	Подлежит уточнению
	14,019	108,871		
	13,924	108,854		
	13,824	108,991		
Стрелковый полигон региона 3 (VVD56)	15,954	108,093	От поверхности	Высота неизвестна
	15,952	108,084		
	15,953	108,087		
	15,954	108,087		
Опасная зона Кхамдык (VVD22)	15,631	108,067	От земли	8000 м
	15,225	108,033		
	15,250	107,775		
	15,617	107,858		

- Круглая бесполётная зона

Название	Широта центра	Долгота центра	Радиус	Нижний предел	Верхний предел
Зона ВВС 40 (VVR11)	15,406	108,706	15	500 м	8000 м
Зона ВВС 41 (VVR12)	15,883	107,884	15	1800 м	8000 м
Зона ВВС 42 (VVR13)	15,675	108,395	15	100 м	8000 м
Зона ВВС 47 (VVR17)	16,000	108,551	15	100 м	8000 м
Зона ВВС 40 (VVR18)	15,758	108,801	15	700 м	8000 м

Примечание: ВВС: военно-воздушные силы.