

На правах рукописи

Гимишян Микаел Карапетович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова), на кафедре № 25 «Управления воздушным движением».

Научный руководитель: **Шестаков Иван Николаевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации»

Оппоненты: **Скрыпник Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте Белорусской государственной академии авиации (БГАА)

Неретин Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела систем самолётовождения филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод» (АО «НПО «Обуховский завод»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «25» сентября 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.002.01 на базе ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38, ауд. 334.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова и на сайте <https://spbguga.ru/root/main/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsij-42-2-002-01/>

Автореферат разослан «16» июля 2026 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 42.2.002.01
кандидат технических наук, доцент

Н.Е. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Необходимость предотвращения интенсификации потенциально-конфликтных ситуаций и исключения превышения норматива пропускной способности зон обслуживания воздушного движения (ОВД) обусловлена существенными изменениями параметров развития воздушной обстановки, часто вызванными случайными событиями стохастической природы (сложные метеорологические условия, технические сбои, задержки и изменения расписаний). В настоящее время отсутствуют утвержденные методики оценки эффективности планирования использования воздушного пространства (ПИВП), позволяющие количественно учитывать вероятность возникновения указанных факторов. Кроме того, в системе менеджмента качества центров ПИВП отсутствует системный подход к научно обоснованному расчету рациональной численности диспетчерского персонала с учетом переменной интенсивности воздушного движения и вероятности нештатных ситуаций. Решение данных проблем путем разработки соответствующих методик, основанных на математическом моделировании, факторном анализе и теории массового обслуживания, является актуальной научно-технологической задачей, имеющей важное значение для повышения безопасности полетов и качества аэронавигационного обслуживания в Российской Федерации.

Научной задачей, решаемой в диссертации, является разработка и внедрение методики оценки и обеспечения эффективности планирования использования воздушного пространства на основе математического моделирования технологических процессов и факторного анализа для динамической оптимизации численности диспетчерского персонала в условиях воздействия случайных факторов и сбойных ситуаций.

Степень решения научной задачи. Большой вклад в развитие теоретических и практических вопросов аэронавигационного обслуживания, организации потоков ВС и координирования ИВП внесли отечественные ученые: Т.Г. Анодина, В.М. Затонский, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский, Е.А. Куклев, С.Л. Олексин, А.П. Плясовских, С.Г. Пятко, Л.Е. Рудельсон, В.А. Санников, Е.С. Соколов, В.А. Солодухин, Ю.Ф. Цепляев, Ю.Г. Шатраков, И.Н. Шестаков и др., а также зарубежные исследователи: В.А. Avad, Е.Yu. Barzilovich, Yu.K. Belyaev, J. Martin, R.R. Razakov, J. Walrand и др. Вместе с тем проблема обеспечения качества планирования и эффективности технологических процессов ПИВП, а также методы их количественного оценивания остаются не решенными. Недостаточное внимание уделяется исследованиям деятельности диспетчерского персонала ПИВП. Отсутствует система анализа факторов, позволяющая определить основные направления совершенствования менеджмента качества функционирования региональных центров ЕС ОрВД в условиях динамической воздушной обстановки.

Объектом исследования являются технологические процессы планирования, координирования и использования воздушного пространства Российской Федерации, реализуемые региональными центрами ЕС ОрВД.

Предметом исследования являются методы оценки и обеспечения качества и эффективности планирования использования воздушного

пространства в рамках технологической процедуры предоставления государственной услуги по аэронавигационному обслуживанию пользователей воздушного пространства Российской Федерации.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности и безопасности аэронавигационного обслуживания за счет разработки методики оценки и обеспечения эффективности ПИВП на основе математического моделирования технологических процессов и факторного анализа для оптимизации численности диспетчерского персонала в условиях воздействия случайных факторов.

Для достижения поставленной цели в ходе диссертационных исследований решены следующие задачи:

1. Проведен комплексный анализ технологических процессов планирования и координирования ИВП, выявлены основные проблемы и систематизированы сбойные ситуации, влияющие на качество обслуживания пользователей воздушного пространства.

2. Сформирована система показателей оценки эффективности технологических процессов ПИВП и обосновано применение центроидного метода факторного анализа для выявления латентных факторов, определяющих качество работы центров ЕС ОрВД.

3. Разработана математическая модель оценки эффективности технологических операций ПИВП, учитывающая совокупные затраты времени, вероятность возникновения сбойных ситуаций и эргатическую сложность обработки сообщений.

4. Предложен метод определения эргатической сложности обработки сообщений при ПИВП, основанный на использовании гипергеометрического распределения разноплановых сообщений с учетом сбойных ситуаций.

5. Разработана методика определения рациональной численности диспетчерского персонала оперативных центров ПИВП на основе теории массового обслуживания, позволяющая учитывать интенсивность потока заявок и вероятность возникновения нештатных условий.

6. Выполнена экспериментальная проверка и апробация разработанных моделей и методик на реальных данных деятельности Санкт-Петербургского и Хабаровского региональных центров ЕС ОрВД, подтвердившая их эффективность и практическую значимость.

Научная новизна работы. Разработана единая методика оценки и обеспечения эффективности ПИВП, которая, в отличие от существующих подходов, базируется на синтезе методов факторного анализа, теории массового обслуживания и вероятностного моделирования сбоев. Это позволило ввести количественный показатель эргатической сложности обработки сообщений и обосновать алгоритм динамического регулирования численности диспетчерского персонала, что дало новый научный инструмент для оптимизации организационной структуры региональных центров ЕС ОрВД в условиях динамической воздушной обстановки.

Научная новизна работы состоит в том, что в разработанном методе:

1. Впервые применен центроидный метод факторного анализа для

выявления скрытых зависимостей между разнородными показателями, определяющими эффективность ПИВП, что позволило выделить четыре латентных фактора и установить доминирующую роль фактора «эффективность работы персонала».

2. Разработана математическая модель оценки эргатической сложности обработки сообщений на основе гипергеометрического распределения, позволяющая перейти от качественных оценок нагрузки диспетчера к количественным показателям с учетом сбойных ситуаций.

3. Разработана методика определения рациональной численности персонала ПИВП на базе формул теории массового обслуживания (Хинчина-Палачека), учитывающая интенсивность потока заявок, вероятность перегрузки системы и критические значения загрузки.

Методология исследования базируется на комплексном и системном подходе с использованием фундаментальных положений теории вероятностей, математической статистики, теории массового обслуживания, адаптированного центроидного метода факторного анализа, а также метода экспертных оценок для анализа уровня автоматизации и квалификации персонала.

Информационную и статистическую базу исследования составляют: отраслевая нормативно-справочная информация, Технологический регламент функционирования региональных центров ЕС ОрВД, Федеральные правила использования воздушного пространства РФ. Эмпирическая база сформирована на основе реальных производственных данных Санкт-Петербургского и Хабаровского региональных центров ЕС ОрВД за период 2022–2025 гг. (общий объем обработанных сообщений составил более 1,4 млн единиц ежегодно), что позволило подтвердить гипотезу о пуассоновском характере поступления заявок и экспоненциальном распределении интервалов между ними.

Теоретическая значимость заключается в обосновании применения распределения Пуассона для описания интенсивности потока задач и экспоненциального закона для интервалов между ними, что подтверждено статистической проверкой гипотез; в разработке математической модели минимизации совокупных затрат на технологические операции ПИВП с учетом вероятности сбойных ситуаций и эргатической сложности обработки сообщений, что расширяет теоретическую базу в области аэронавигации и управления воздушным движением.

Практическая значимость заключается в том, что разработанная методика позволяет принимать обоснованные управленческие решения по оптимизации организационной структуры и штатного расписания центров ПИВП, обеспечивая строгое выполнение требований технологических регламентов при переменной интенсивности движения. Результаты внедрены в производственную деятельность филиалов «Аэронавигация Северо-Запада» и «Аэронавигация Дальнего Востока», что подтверждено снижением среднего времени обработки планов полетов на 25% и уменьшением вероятности возникновения сбойных ситуаций на 30%. Методика также интегрирована в учебный процесс для подготовки и повышения квалификации авиационных специалистов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель оценки эффективности технологических процессов планирования и координирования использования воздушного пространства (ПИВП), отличающаяся учетом качественных показателей эффективности, воздействия случайных факторов и возникновения сбойных ситуаций в процессе использования воздушного пространства.

2. Метод определения эргатической сложности обработки сообщений при ПИВП, основанный на выполнении требований технологических регламентов функционирования региональных центров ЕС ОрВД Российской Федерации с использованием гипергеометрического распределения разного вида сообщений по ИВП.

3. Методика определения рациональной численности диспетчерского персонала ПИВП, обеспечивающая достижение необходимого уровня безопасности полетов на этапах планирования и координирования ИВП за счет учета интенсивности потока заявок и вероятности нештатных условий.

Соответствие содержания диссертации требованиям специальности 2.9.6 – «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники». Объектом исследования выступают технологические процессы центров планирования и координирования использования воздушного пространства (ПИВП) оперативных органов ЕС ОрВД, а предметом – методы оценки их эффективности и оптимизации кадрового обеспечения.

Содержание работы полностью соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности:

– п. 2 «Совершенствование методов и средств управления и планирования полетов, механизации и автоматизации процессов эксплуатации воздушного транспорта», в части разработки математических моделей технологических операций ПИВП и алгоритмов их автоматизированной обработки;

– п. 9 «Аэронавигационное обеспечение полетов, закономерности процессов навигации, управление движением отдельных воздушных судов и их потоков», применительно к формированию планов полетов, организации потоков воздушного движения и минимизации сбойных ситуаций;

– п. 10 «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением», в контексте адаптации информационного обмена к обновлённым нормативным требованиям, включая Табель сообщений 2026 г.;

– п. 11 «Обоснование авиационных правил, требований к авиационной технике, эксплуатации воздушных судов, обслуживанию воздушного движения и использованию воздушного пространства, аэронавигационному обеспечению полетов», через научно обоснованный расчёт рациональной численности диспетчерского персонала и установление количественных критериев эргатической сложности;

– п. 14 «Анализ и прогнозирование состава и структуры парка воздушных судов, сети авиалиний, повышение эффективности деятельности авиапредприятий, систем их материально-технического обеспечения,

организаций управления воздушным движением», за счёт применения факторного анализа и аппарата теории массового обслуживания для оптимизации организационной структуры региональных центров ЕС ОрВД.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на научно-практических семинарах предприятий по аэронавигационному обслуживанию Российской Федерации, международных форумах и научно-практических конференциях. Обсуждены основные положения диссертации, подтверждена их актуальность и практическая направленность.

Внедрение результатов работы. Разработанные методики внедрены в деятельность Филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (Санкт-Петербургский региональный центр ЕС ОрВД) и Филиала «Аэронавигация Дальнего Востока» (Хабаровский региональный центр ЕС ОрВД), что подтверждено актами внедрения. Результаты также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СПбГУ ГА им. А.А. Новикова» при подготовке студентов по специальности 25.05.05 «Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения» и повышении квалификации в НЕУ ДПО «Институт Аэронавигации».

Публикации. По результатам исследования опубликовано 6 печатных трудов, в том числе: 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 3 публикации в других изданиях и сборниках материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 193 наименований и приложений. Полный объем диссертации составляет 186 страниц текста, иллюстрированного 38 рисунками, содержит 29 таблиц и 103 формулы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана оценка степени разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Изложены положения, выносимые на защиту. Отражены апробация и внедрение результатов исследования.

В первой главе диссертационной работы проведён комплексный анализ технологических процессов центров ПИВП, выявлены основные проблемы и систематизированы сбойные ситуации, влияющие на качество обслуживания. Рассмотрены особенности процедур планирования, задачи, решаемые центрами ПИВП в соответствии с Приказом Росавиации № 1414-П, и технологические особенности деятельности персонала. Выделены три этапа планирования (стратегический, предтактический, тактический), определены их цели и методы реализации.

Проведён ретроспективный анализ интенсивности воздушного движения в воздушном пространстве РФ за период 2000–2025 гг., показавший устойчивый рост совокупной интенсивности в 2,2 раза при структурной трансформации внутреннего и международного сегментов. Проанализирована

деятельность Главного центра ЕС ОрВД за 2025 г., обработавшего свыше 9,2 млн телеграфных сообщений. Установлена доминирующая роль человеческого фактора: классифицированы ошибки исполнения (промахи и упущения), определены их причины в условиях высокой когнитивной нагрузки и перехода с правилowego на знаниевый уровень принятия решений.

Систематизированы сбойные ситуации: нарушения сроков подачи планов, ошибки форматирования (формирование сообщений REJ), превышение пропускной способности секторов ОВД, технические сбои сетей передачи данных (>15 мин) и аварийные стадии (INCERFA, ALERFA, DETRESFA). Выявлена прямая корреляция: рост REJ $>5\%$ увеличивает задержки на 15–20%, превышение НПС $>10\%$ снижает коэффициент соблюдения регламента до 0,78.

Проведенный анализ процессов ПИВП РегЦ ЕС ОрВД показывает, что часто вводимые ограничения на использование воздушного пространства становятся причиной дезорганизации потоков воздушного движения. Это требует поиска новых методов и подходов для:

1. Обеспечения равномерной загруженности зон ОВД.
2. Повышения качества обслуживания пользователей воздушного пространства.
3. Разработки универсальных показателей оценки эффективности планирования ИВП.

Таким образом, реализация полного цикла этапов планирования и координации ИВП является основной целью деятельности персонала, от которой зависит эффективность предоставляемых услуг пользователям воздушного пространства. Основываясь на этом сформулированы соответствующие научные задачи, решаемые в диссертации – разработана математическая модель оценки эффективности предоставляемых услуг пользователям в части ПИВП, методы расчета показателей эффективности ПИВП и на основании предложенных методов и моделей предложена методика оценки и обеспечения эффективности ПИВП. Также в первой главе сделан вывод о невозможности дальнейшей работы исключительно качественными методами и необходимости перехода к формализованным количественным моделям, учитывающим стохастическую природу возмущений.

Во второй главе разработана комплексная математическая модель обеспечения эффективности технологических процессов ПИВП. Сформулирована концепция планирования, базирующаяся на принципах централизации, гибкости, равномерной загруженности зон ОВД и экономичности. Обоснован принцип оптимальности работы диспетчера ПИВП как центрального звена технологических процессов, восстановленный через обратную задачу линейного программирования с учётом отношений предпочтительности на множестве допустимых решений.

Математическая модель строится на минимизации совокупных затрат на выполнение деятельности по ИВП при соблюдении ограничений безопасности и пропускной способности. Целевая функция минимизации затрат имеет вид:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

где: C_{ij} – затраты на обеспечение всех видов деятельности по ИВП i ($i=1,n$) в зоне j ($j=1,m$) при ПИВП; x_{ij} – бинарная переменная, равная 1, если рейс i назначен зоне j , и 0 в противном случае.

Введены ограничения на назначение рейсов, пропускную способность секторов и допустимый уровень риска.

Система ограничений, учитывает, что каждый рейс должен быть назначен ровно одной зоне:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \forall i \quad (2)$$

Пропускная способность (см. Гл. 3, п.3.2) зон не должна быть превышена:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq \eta_j, \forall j \quad (3)$$

где a_{ij} – интенсивность i -го вида деятельности по ИВП в зоне j ;

η_j – пропускная способность зоны j .

Для учета вероятности возникновения сбойных ситуаций (см. Гл. 1, п. 1.5) вводится дополнительное ограничение:

$$\sum_{i=1}^n p_i x_{ij} \leq P_j, \forall j \quad (4)$$

где: p_i – вероятность возникновения нештатной ситуации для рейса i (которая может получена из квартальные отчеты центры ЕС ОрВД, статистика полетов и деятельности по ИВП); P_j – допустимый уровень риска для зоны j (согласно *Руководству по СУБП ПАНО*¹).

Для исследования модели сформирована система из 12 показателей обеспечения эффективности: пропускная способность секторов ОВД, $\mu^{ОВД}$; количество аэродромов в секторах ОВД, $N_{АД}^{ОВД}$; среднесуточная интенсивность полётов судов, $\lambda_{общ}^{ОВД}$; среднесуточная интенсивность полётов воздушных судов государственной авиации по маршрутам с пересечением воздушных трасс, $\lambda_{зос+перес}^{ОВД}$; количество ведомственных аэродромов в секторе ОВД, $N_{АД}^{зос}$; количество точек пересечения ВТ с маршрутами полётов ведомственной авиации, запретными зонами, зонами ограниченных полетов, $N_{зос}^{зос}$; качество технического обеспечения и средствами связи центров ПИВП и секторов ОВД, $K_{ср.связи}^{ОВД}$; уровень квалификации диспетчерского состава центра ПИВП, $K_{квалиф.}^{ПИВП}$; уровень автоматизации технологических процессов ПИВП, $U_{автом.}^{ПИВП}$; коэффициент эргатической сложности обработки сообщений по ИВП, $E_{план.}^{ПИВП}$; организационная структура диспетчерского пункта (численность персонала

¹ СУБП ПАНО – система управления безопасностью полетов поставщика аэронавигационного обслуживания

ПИБП, приведенная к их загруженности), $S_{\text{ДП}}^{\text{ПИБП}}$; средняя частота появления метеорологических условий, влияющих на выполнение программы полета ВС в секторах ОВД, $M_{\text{средн.част.}}^{\text{ОВД}}$.

Для определения основных направлений обеспечения качества обслуживания пользователей воздушного пространства диспетчерским персоналом ПИБП регионального центра в диссертационной работе использован центроидный метод. Особенность выбора этого метода заключается, прежде всего, в существенно более простой вычислительной процедуре, что позволяет использовать эту модель при обработке предварительно стандартизированных эмпирических данных небольших объемах. Поэтому, в силу перехода к единой системе измерений, редуцированная корреляционная матрица не теряет логической цельности, так что центроидный метод есть метод приближенного решения задачи.

$$\sum_{k=1}^m \left[\sum_{j=1}^n |(\hat{x}_j, f_k)| \right] = \max, \quad (5)$$

при условии:

$$(f_k, f_l) = \begin{cases} N, & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \quad k, l = \overline{1, m}, \quad (6)$$

При этом, общие факторы $f^1, \dots, f^m$ определяются последовательно путем решения на каждом k -м шаге задачи:

$$\sum_{j=1}^n |(\hat{x}_j, f_k)| = \max, \quad (7)$$

$$(f_j, f_k) = N, (f_j, f_k) = 0; \quad j = \overline{1, k-1}, \quad (8)$$

где: m – число факторов;
 n – число параметров;
 f_k – вектор k -го фактора;
 $\hat{x}_j$ – вектор j -го параметра;

Реализация данного метода сводится к пошаговому вычислению факторных нагрузок. Так, на первом шаге определяются компоненты вектора α_1 – факторные нагрузки на первый фактор f_1 . Эти компоненты находятся из соотношения г:

$$\alpha_{1q} = \frac{\sum_{d,j=1}^n \sigma_{j1} r_{iq}}{\sqrt{\sum_{p,s=1}^n \sigma_{p1} \sigma_{s1} r_{ps}}}, \quad q = \overline{1, n}, \quad (9)$$

в которых коэффициенты σ_{j1} могут принимать одно из двух значений $+1$ или -1 , причем выбор этих значений производится путем решения подзадачи:

$$\sum_{p,s=1}^n \sigma_{p1} \sigma_{s1} r_{ps} = \max \quad (10)$$

Произвольный k -й шаг. Вектор α_k факторных нагрузок на k -й фактор находится по формуле):

$$\alpha_{kq} = \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{jk} \left(r_{jq} - \sum_{l=1}^{k-1} \alpha_{lj} \alpha_{lq} \right)}{\sqrt{\sum_{p,s=1}^n \sigma_{pk} \sigma_{sk} \left(r_{ps} - \sum_{l=1}^{k-1} \alpha_{lp} \alpha_{ls} \right)}} \Rightarrow \max, \quad (11)$$

где коэффициенты $\sigma_{jk} = \pm 1$ находятся из решения подзадачи:

$$\sum_{p,s=1}^n \sigma_{pk} \sigma_{sk} \left(r_{ps} - \sum_{l=1}^{k-1} \alpha_{lp} \alpha_{ls} \right) \Rightarrow \max \quad (12)$$

Следует также отметить ту особенность центроидного метода, которая заключается в необязательном выполнении условия (11), и числовое значение m можно задавать искусственно, исходя из личных соображений исследователя. Как правило, это значение в каждом конкретном случае будет нести определенную смысловую нагрузку и зависит от количества рассматриваемых параметров. В нашем случае достаточно ограничиться количеством общих факторов, исходя из условия.

$$\text{def: } N+m < (N-m)^2 \quad (13)$$

Решая неравенство (13) относительно m при условии $N=12$, получаем, что $11,5 > m > 4$. То есть число общих факторов для процедуры обобщения рекомендуется принимать не менее 4.

Во второй главе обосновано применение факторного анализа (центриодный метод) для выявления латентных факторов и перехода от разнородных параметров к единой шкале измерений, что создаёт теоретический базис для последующей методики оценки.

В третьей главе изложена методика оценки эффективности технологических процессов ПИВП и приведены результаты её апробации. Описана процедура стандартизации исходной матрицы данных Z (вычисление средних, дисперсий, несмещённых оценок, построение матрицы X_{ij}).

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{1\ 1} & Z_{1\ 2} & \dots & Z_{1\ j} & \dots & Z_{1\ 12} \\ Z_{2\ 1} & Z_{2\ 2} & \dots & Z_{2\ j} & \dots & Z_{2\ 12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{i\ 1} & Z_{i\ 2} & \dots & Z_{i\ j} & \dots & Z_{i\ 12} \\ Z_{10\ 1} & Z_{10\ 2} & \dots & Z_{10\ j} & \dots & Z_{10\ 12} \end{pmatrix} \quad (14)$$

В этой матрице элемент $Z_{i\ j}$ указывает значение, которое принимает j -й параметр в i -м секторе ОВД. Отметим, что параметры имеют разный физический смысл. Это приводит к тому, что матрица данных будет существенно изменяться, а порой терять свое смысловое содержание, если менять единицы, в которых производится измерение тех или иных параметров; это обстоятельство влечет за собой то, что различные столбцы матрицы данных (т.е. различные параметры) оказываются трудно сопоставимыми между собой (таблица 1). Поэтому матрицу данных до проведения анализа необходимо

привести к стандартному виду – к некоторой единой стандартной шкале, на её основе сформирована корреляционная матрица R_{ii} и редуцированная корреляционная матрица, что будет рассмотрено в Главе 4.

Для количественной оценки эффективности ПИВП сформирована информационная матрица данных Z размерностью $N \times n$ (где $N=10$ – количество секторов ОВД, $n=12$ – количество показателей), элементы которой z_{ij} отражают значение j -го параметра в i -м секторе. В связи с разнородностью физических смыслов и единиц измерения параметров, матрица приведена к стандартизированному виду X по формуле:

$$x_{ij} = \frac{z_{ij} - \bar{z}_j}{\sqrt{D_j^*}}, \quad D_j^* = \frac{N}{N-1} \cdot D_j \quad (15)$$

где $\bar{z}_j$ – среднее значение параметра, D_j^* – несмещённая оценка дисперсии.

Таблица 1 – Матрица данных Z .

РЦ ЕС Показатели	РЦ-1	РЦ-2	РЦ-3	РЦ-4	РЦ-5	РЦ-6	РЦ-7	РЦ-8	РЦ-9	РЦ-10
$\mu^{ОВД}$	33	33	39	39	45	43	40	39	34	32
$N_{АД}^{ОВД}$	4	3	5	3	2	2	3	2	5	3
$\lambda_{общ}^{ОВД}$	13	21	25	19	15	13	20	11	14	12
$\lambda_{гос+перес}^{ОВД}$	1,25	1,04	0,5	0,33	0,83	1,3	1,33	0,25	0,71	0,33
$N_{АД}^{гос}$	4	3	3	1	2	1	2	2	3	1
$N_{гос}^{огр}$	6	8	8	4	8	3	10	8	12	9
$K_{ср.связи}^{ОВД}$	0,5	0,88	0,92	0,6	0,89	0,91	0,3	0,8	0,8	0,7
$K_{квалиф.}^{ПИВП}$	0,52	0,44	0,37	0,61	0,21	0,48	0,57	0,38	0,55	0,36
$U_{автом.}^{ПИВП}$	4,21	4,34	4,8	4,7	4,3	4,22	4,03	4,11	4,23	3,8
$E_{план.}^{ПИВП}$	0,39	0,49	0,44	0,79	0,55	0,48	0,47	0,78	0,62	0,5
$S_{ДП}^{ПИВП}$	0,2	0,18	0,23	0,23	0,34	0,24	0,23	0,23	0,29	0,21
$M_{средн. част.}^{ОВД}$	2,3	0,9	0,65	0,3	0,5	0,7	3,1	2,3	4,1	1,6

Показатели 2, 3, 4, 5, 6, 12 определяются методом статистической обработки данных, источником которых выступают материал Гл. 1 п. 1.2, 1.3, бюллетень доступности воздушного пространства, официальные информационные ресурсы ЦАИ ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» и др.

Показатели 1, 7, 8, 9 рассчитываются на основе применяемых на практике требований технологических регламентов, установленных методик менеджмента качества и системы управления безопасности полетов.

Определение показателя №1 (пропускная способность) выполнено в соответствии с методикой Росавиации (приказ №757 от 07.11.2012). Типовое значение нормативной пропускной способности (НПС) рассчитывается по формуле:

$$НПС_{тип} = 37,1 - 0,1 \cdot T_{ср.взвеш.} + 0,33 \cdot PT - 0,22 \cdot N_{пер} - 1,5 \cdot N_{кр}, \quad (16)$$

где: $НПС_{тип}$ – типовое значение норматива пропускной способности диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД, измеряемое в количестве воздушных судов, обслуженных за один астрономический час;

$T_{ср.взвеш.}$ – средневзвешенное время пребывания воздушного судна в границах зоны ответственности диспетчерского пункта (сектора), выраженное в минутах;

PT – процент воздушных судов в потоке, движущихся по разведенным воздушным трассам (организованным таким образом, чтобы минимизировать пересечения и конфликты между потоками);

$N_{пер}$ – количество точек пересечения между однонаправленными значимыми потоками воздушного движения;

$N_{кр}$ – количество узловых точек пересечения потока воздушного движения, характеризующихся повышенной сложностью работы диспетчера УВД (например, точки с высокой интенсивностью движения или сложной конфигурацией маршрутов);

Расчет типовых значений нормативной пропускной способности (НПС) диспетчерских пунктов основывается на средневзвешенном времени нахождения воздушных судов в зоне ответственности, которое зависит от типа ВС и его скоростного диапазона. Для каждого типа ВС определяются относительное количество полетов (%) и среднее время пребывания в зоне, что позволяет рассчитать типовое значение НПС.

Уровень рабочей нагрузки диспетчера оценивается интегральным показателем загруженности K_z , отражающим соотношение времени выполнения задач управления воздушным движением к общему интервалу оценки. Показатель K_z определяется по графику зависимости $K_z = f(ИВД/НПС)$ (рис. 1), построенному на основе экспериментальных исследований загруженности диспетчеров и анализа их психофизиологических возможностей. Данный подход позволяет количественно оценить степень занятости диспетчера и эффективность выполнения обязанностей при текущей интенсивности воздушного движения.

С учетом воздействия дополнительных факторов, которые распространяются только на часть обслуживаемого воздушного движения, значение коэффициентов уточняется по формуле:

$$k_{ij} = \frac{m_0 + m_i \cdot k_i}{100}, \quad (17)$$

где: m_0 – процент воздушных судов, на обслуживание которых действие k -го фактора не распространяется;

m_i – процент воздушных судов, на обслуживание которых действие k -го фактора распространяется.

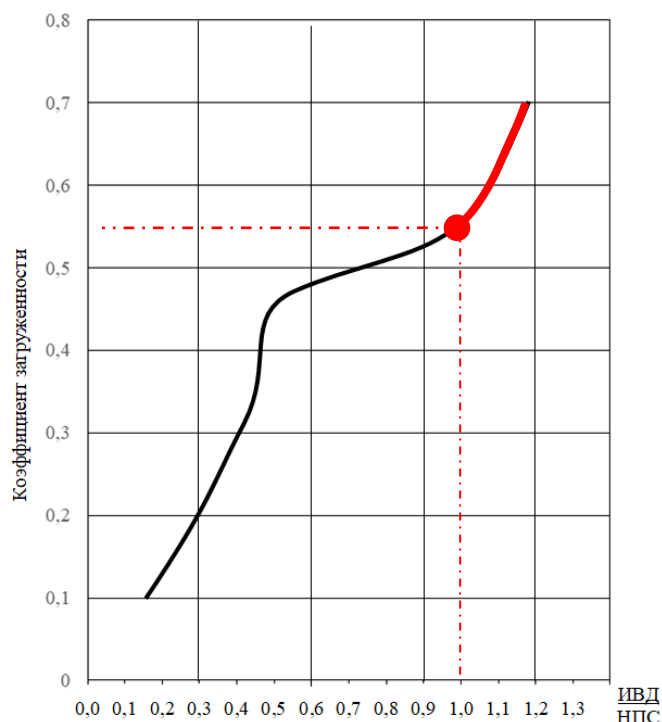


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента загрузки от соотношения интенсивности воздушного движения и нормативного значения пропускной способности

Окончательное значение НПС определяется с учётом коэффициентов влияния дополнительных факторов (k_{ij}):

$$НПС = НПС_{мин} \cdot \prod k_{ij}, \quad (18)$$

где $\prod k_{ij}$ – произведение коэффициентов, учитывающих влияние всех дополнительных факторов, выбранных для оцениваемого диспетчерского пункта или сектора.

Группы дополнительных факторов, влияющих на сложность обслуживания воздушного движения, определяются в зависимости от их воздействия на работу диспетчерского пункта или сектора. Если действие фактора распространяется только на часть обслуживаемого воздушного движения, то значение коэффициента k_i уточняется по формуле (18). В противном случае, если влияние фактора распространяется на весь поток воздушного движения, то $k_{ij} = k_i$.

В результате проведенных расчётов в третьей главе, НПС для секторов Санкт-Петербургского РегЦ ЕС ОрВД с учетом $\prod k_{ij}$ можно получить таблицу 2:

Таблица 2 – Нормативы пропускной способности секторов
РегЦ ЕС ОрВД Санкт-Петербургского центра ОВД

№ РЦ	Сектора	1 диспетчер	2 диспетчера
		НПС, ВС/час	НПС, ВС/час
РЦ-1	Север	33	43
РЦ-2	Юго-Восток	33	44
РЦ-3	Юго-Запад	39	51
РЦ-4	Запад	39	51
РЦ-5	Петрозаводск	45	58
РЦ-6	Великие Луки	43	56
РЦ-7	Мурманск	40	51
РЦ-8	Сыктывкар	39	48
РЦ-9	Архангельск	34	44
РЦ-10	Вологда	32	40

Таким образом, расчет окончательного значения НПС диспетчерского пункта или сектора органа ОВД представляет собой комплексный процесс, учитывающий как основные, так и дополнительные факторы. Этот подход позволяет обеспечить безопасность и эффективность работы системы управления воздушным движением, а также минимизировать нагрузку на диспетчеров ПИВП.

Показатели №7–9 (качество технического обеспечения, уровень квалификации персонала, уровень автоматизации) рассчитаны по следующим методикам:

- **качество технического обеспечения** ($K_{ср.связи}^{ОВД}$): через отношение нормативной и фактической наработки на отказ РТС:

$$K_{ср.связи}^{ОВД} = \frac{\bar{T}}{T_{тех}}, \quad (19)$$

где: $T_{тех}$ – технологическая наработка на один отказ, установленная нормами на эксплуатационные и технические характеристики радиотехнических средств (РТС) и рекомендациями ИКАО;

$\bar{T}$ – наработка на отказ от момента t_1 до момента времени t_2 , определяемая по следующему приближенному уравнению:

$$\bar{T} = \frac{t_2 - t_1}{m(t_1 - t_2)}, \quad (20)$$

где $m(t_1 - t_2)$ – число отказов за промежуток времени $(t_1 - t_2)$.

- **уровень квалификации** ($K_{квалиф.}^{ПИВП}$):

$$K_{квалиф.}^{ПИВП} = \frac{O \cdot H}{B}, \quad (21)$$

где: O – коэффициент учитывающий уровень образования и принимает одно из трех значений: 1 – высшее профильное образование, 0,78 – среднее профильное образование, 0,6 – прочие условия; H – общий стаж; B – возраст.

- **уровень автоматизации** ($U_{автом.}^{ПИБП}$): экспертная оценка по шкале Суварева с учётом дефицита времени.

$$U_{автом.}^{ПИБП} = W_i D, \quad (22)$$

где: D – дефицит времени, принимающий одно из трех значений:

1 – при условии своевременного предоставления услуг; 0,85 – при условии предоставления услуг с задержкой до времени, предусмотренного табелем сообщений; 0,2 – при условии задержки в предоставлении услуг, превышающей норматив; W_i – усредненный вес оценки каждого эксперта.

Расчета качественных показателей обеспечения эффективности планирования и координирования использования воздушного пространства на основе данных Санкт-Петербургского центра ЕС ОрВД приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет качественных показателей обеспечения эффективности ИВП

РЦ ЕС	РЦ-1	РЦ-2	РЦ-3	РЦ-4	РЦ-5	РЦ-6	РЦ-7	РЦ-8	РЦ-9	РЦ-10
Показатели										
$K_{ср.связи}^{ОВД}$	0,5	0,88	0,92	0,6	0,89	0,91	0,3	0,8	0,8	0,7
$K_{квалиф.}^{ПИБП}$	0,52	0,44	0,37	0,61	0,21	0,48	0,57	0,38	0,55	0,36
$U_{автом.}^{ПИБП}$	4,21	4,34	4,8	4,7	4,3	4,22	4,03	4,11	4,23	3,8

При реализации персоналом ПИБП разрешения всех потенциальных конфликтов в секторах и при регулировании интенсивности воздушного движения, обеспечивающего соблюдение нормативов загруженности диспетчерского персонала УВД и пропускной способности секторов ОВД, из-за возникновения сбойных ситуаций случайного характера возможна некачественная организация воздушного движения. Последнее ставит под сомнение эффективность оказания услуг по планированию ИВП и, как следствие, качество обслуживания пользователей и эксплуатантов. В связи с этим целесообразно ввести универсальный коэффициент, затрагивающий как количественные, так и качественные аспекты планирования ИВП.

Приближенные критерии значимости больших выборок могут являться удачными характеристиками, поскольку распределение случайной величины, принимающей неотрицательные значения частоты появления событий, имеют коэффициент вариации больше единицы.

Математический смысл заключается в следующем: если из конечной совокупности объема N извлекается случайная выборка объема n и если во всей совокупности имеется ровно M элементов, обладающих признаком Y , а остальные $N-M$ этим признаком не обладают, то количество элементов с этим признаком среди отобранных будет случайной величиной. Обозначим ее μ . Под обозначением M понимается определенное количество планов, которые корректировались специалистами ПИБП с целью обеспечения эффективного планирования ИВП (без ПКС и перегрузок). Соответственно $N-M$ – планы,

которые не подвергались корректировке. В этом случае Y характеризует признак корректировки плана полетов на определенном этапе. Таким образом, μ – количество планов среди скорректированных, но не являющихся событийными (конфликтными или приведшими к перегрузке секторов ОВД).

Если ни одна из вышеперечисленных величин недостаточно мала, то их распределение аппроксимируется нормальным. В этом случае заслуживает внимание β -аппроксимация:

$$P\left(\frac{\mu}{M, h}\right) \approx l_{1-x}(h' - \mu + C, \mu - C + 1) \quad (23)$$

где: $l_{1-x}(a, b)$ – функция β -распределения.

Предварительно с целью построения приблизительного критерия, составляется таблица сопряженности признаков - 2×2 , что позволяет вычислить верхний и нижний предел x_1 и x_2 для вероятности x , заданной формулой:

$$x = \frac{H(h + M - 1) - 2hM}{H(h - 2)} \quad (24)$$

Согласно обозначения квантилей – распределения, введенным при описании соответствующих таблиц (см. Гл.3, п. 3.4, таб. 13, 14), имеем:

$$x_1 = X(0,01Q, \mu - C, h' - \mu + C + 1), \quad (25)$$

$$x_2 = 1 - X(0,01Q, h' - \mu + C, \mu - C + 1), \quad (26)$$

где $X(P, a, b)$ – P -квантиль распределения с параметрами a и b ;

Величины h' и C определяются формулами (27, 28):

$$h' = \frac{(H - 2)^2}{H - 1} \cdot \frac{hM(H - h)(H - M)}{[(H - h)(H - M) + hM - H][H(h + M - 1) - 2hM]} \quad (27)$$

$$C = \frac{hM(M - 1)(h - 1)}{(H - 1)[(H - h)(H - M) + hM - H]} \quad (28)$$

Если нарушается одно из неравенств (18), то соответствующая таблица - 2×2 (см. Гл.3, п. 3.4, таб. 13) считается значимой. Такой двусторонний критерий имеет уровень значимости $2Q\%$.

$$x_1 < x < x_2 \quad (29)$$

В диссертационной работе математическая модель планирования воздушного движения представлена для оптимизации процессов планирования использования воздушного пространства (ИВП). Модель учитывает ограничения на пропускную способность элементов воздушного пространства, загруженность диспетчерского состава и другие параметры.

В приложении 1 диссертационной работы представлен программный код математической модели рационального предтактического планирования воздушного движения на языке Python, реализующий задачу линейного программирования для оптимизации планирования полетов с использованием библиотеки «PuLP».

Если выполняется условие $2h > H$, то критерий значимости с уровнем $Q\%$ строится на основе одной величины x_1 . В этом случае таблица сопряженности

размером 2×2 считается значимой, если $x < x_1$, и незначимой в противном случае.

С целью построения приблизительного критерия, составляется таблица сопряженности признаков (таблица 4), что позволяет, согласно обозначениям квантилей β -распределения, вычислить верхний и нижний пределы x_1 и x_2 для вероятности x события μ .

Таблица 4 – Таблица сопряженности признаков.

	С признаком	Без признака	Всего
Выборка, или 1-я группа	μ	$h-\mu$	h
Остаток, 2-я группа	$M-\mu$	$H-h-M+\mu$	$H-h$
Всего	M	$H-M$	H

В зависимости от ряда внешних условий используется односторонний или двухсторонний критерий значимости с определенным уровнем Q .

Для построения универсального коэффициента оценки эффективного планирования ИВП могут быть использованы приближенные критерии значимости больших выборок (поступающих сообщений по ИВП) для гипергеометрического распределения поскольку распределение случайной величины, принимающей неотрицательные значения частоты появления событий, имеют коэффициент вариации больше единицы.

Блок-схема расчётов представлена на рисунке 2.

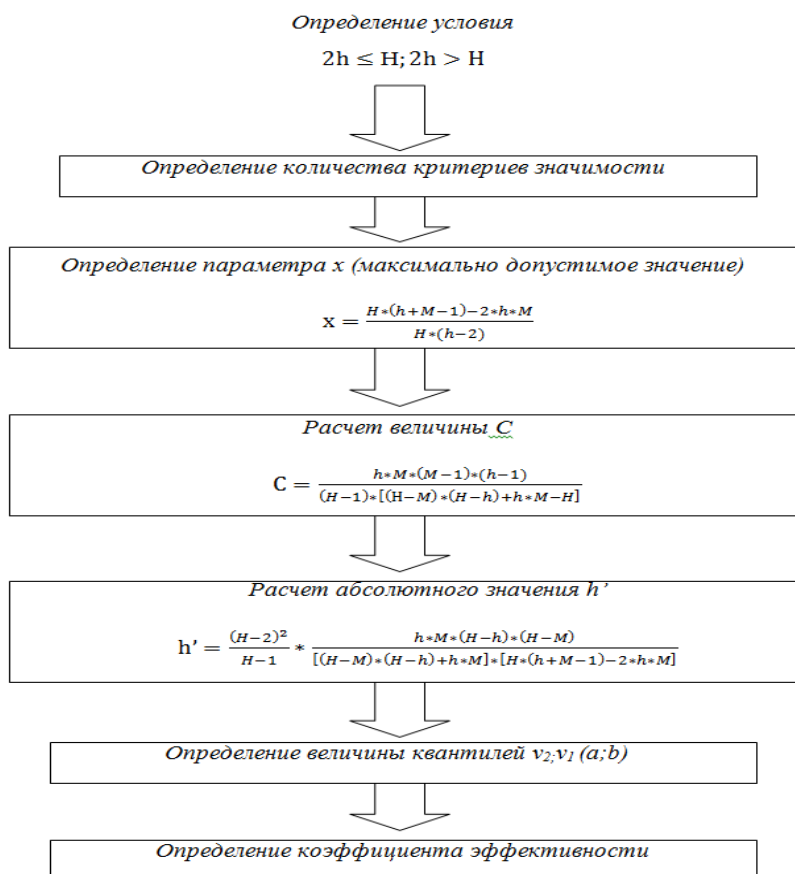


Рисунок 2 - Блок-схема расчетов

В рамках методики впервые предложен метод определения **эргатической сложности** обработки сообщений на основе β -аппроксимации гипергеометрического распределения. Математическая сущность подхода: из совокупности объёма H извлекается выборка h , где M планов скорректированы для исключения ПКС. Количество неконфликтных скорректированных планов η подчиняется распределению, аппроксимируемому β -функцией. Составляется таблица сопряженности признаков 2×2 , вычисляются квантили x_1 и x_2 . Коэффициент эргатической сложности (κ) определяется как:

$$\kappa = \frac{x_1 + x_2}{2} \text{ или } \kappa = x_1 \text{ (при } 2h \geq H \text{)} \quad (30)$$

где x_1, x_2 – квантили β -распределения, определяемые по таблицам для заданного уровня значимости Q , при $|\kappa| \geq 1$ процесс ПИВП не выходит за рамки технологических ограничений.

Проведена апробация на данных Санкт-Петербургского РегЦ ЕС ОрВД. Анализ статистики за 2022–2025 гг. подтвердил адекватность разработанной методики:

- коэффициент эргатической сложности для всех секторов: $\kappa < 1$ (табл. 5);
- рост интенсивности обработки сообщений на 3,1% год за годом коррелирует с увеличением объёма воздушного движения;
- внедрение методики позволило снизить среднее время обработки ФПЛ на 25% и вероятность сбойных ситуаций – на 30%.

Результаты расчётов сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Оценка эффективности планирования ИВП по секторам

РЦ ЕС	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,39	0,49	0,44	0,79	0,55	0,48	0,47	0,78	0,62	0,50

Наиболее эффективное планирование выявлено в секторах 4 и 8 (северо-западное направление), наименее – в секторе 1. Доказано, что $\kappa < 1$ подтверждает устойчивость технологического процесса в рамках регламентных ограничений.

Аналитический подход к оценке эффективности технологических операций ПИВП на основе факторов влияния позволяет объединить оценку загруженность персонала, пропускную способность зон ОВД, количество сбойных ситуаций, уровень автоматизации технологических процессов и т.д. (см. Гл.1, п. 1.3-1.6). Такой подход позволяет получить целостную картину эффективности технологических процессов системы ПИВП, учесть разнородность показателей и принимать обоснованные управленческие решения, устанавливать требуемые показатели в их совокупном влиянии на предоставлении аэронавигационных услуг пользователя ВП.

В результате можно сформулировать математическую суть совокупной оценки эффективности технологических операций ПИВП с учетом сбойных ситуаций (см. Гл.1, п. 1.6), основанную на формировании единой целевой

функции, включающей ключевые показатели технологического процесса ПИВП:

$$\min J = \sum_i^n \sum_j^m (C_{ij}^{\text{ПИВП}} + C_{ij}^{\text{СБ}}) \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^m C_j^{\text{КОНФ}} \cdot y_{ij}, \quad (31)$$

где n – количество вида деятельности по ИВП, подлежащих распределению;

m – количество зон ответственности органов ОВД; x_{ij} – бинарная переменная назначения: $x_{ij}=1$, если рейс i назначен зоне j , иначе $x_{ij}=0$; $C_{ij}^{\text{ПИВП}}$ – технологические затраты времени на обслуживание вида деятельности по ИВП i в зоне j ; $C_{ij}^{\text{СБ}}$ – затраты, обусловленные вероятностью возникновения сбойной ситуации при обслуживании вида деятельности по ИВП i в зоне j ; $C_j^{\text{КОНФ}}$ – дополнительные затраты времени обеспечения вида деятельности по ИВП при превышения пропускной способности зоны j . y_{ij} – бинарная переменная, равная 1 при превышении пропускной способности зоны j , иначе 0.

Разработанная целевая функция минимизации суммарных затрат с учётом сбойных ситуаций является основой математической модели оценки эффективности технологических операций планирования и координирования использования воздушного пространства (ПИВП). Модель интегрирует три ключевых компонента: технологические затраты времени на выполнение установленных процедур ПИВП с учётом эргатической сложности обработки сообщений, качественные показатели (уровень автоматизации, квалификация персонала) и вероятностные характеристики затрат, обусловленных возникновением нештатных ситуаций.

В рамках главы обоснован и реализован метод определения эргатической сложности обработки сообщений при ПИВП, базирующийся на аппроксимации гипергеометрического распределения. Предложенный подход позволяет перейти от качественных оценок нагрузки диспетчера к количественным показателям, учитывающим соотношение скорректированных, отменённых и утверждённых планов полётов, а также вероятность возникновения потенциально-конфликтных ситуаций.

Разработана методика расчёта нормативных значений пропускной способности секторов органов ОВД, учитывающая средневзвешенное время пребывания воздушного судна в зоне ответственности, упорядоченность потоков, количество точек пересечения маршрутов, а также корректирующие коэффициенты, отражающие влияние технического оснащения, полётов с переменным профилем и организационных факторов.

Проведена стандартизация исходных данных и построение корреляционной матрицы показателей обеспечения эффективности ПИВП. С применением центроидного метода факторного анализа выделены четыре латентных фактора, определяющих качество работы центров ЕС ОрВД: эффективность работы персонала ПИВП, организационная структура зон ОВД, уровень автоматизации технологических процессов и метеорологическая обстановка.

Выполнена экспериментальная апробация разработанных методов на реальных данных деятельности Санкт-Петербургского регионального центра ЕС ОрВД за период 2022–2025 гг. Результаты верификации подтвердили адекватность принятых допущений: поступление сообщений по ИВП описывается распределением Пуассона, интервалы между событиями подчиняются экспоненциальному закону, а расчётные значения коэффициента эргатической сложности коррелируют с фактическими показателями загрузки диспетчерского персонала.

Практическая значимость результатов главы заключается в возможности количественной оценки влияния случайных факторов на эффективность ПИВП, обосновании требований к численности диспетчерского состава и формировании научно-обоснованных рекомендаций по оптимизации организационной структуры оперативных органов ЕС ОрВД в условиях динамической воздушной обстановки.

В четвертой главе диссертационного исследования разработаны научно обоснованные рекомендации по повышению эффективности технологических процессов планирования и координации использования воздушного пространства (ПИВП) на основе комплексного применения методов теории массового обслуживания, факторного анализа и вероятностного моделирования.

Анализ оценок общности (h_j^2) подтвердил логическую цельность матрицы нагрузок. Установлено, что доминирующим фактором является «эффективность работы персонала ПИВП», ключевым показателем которой выступает организационная структура диспетчерских пунктов ($S_{ДП}^{ПИВП}$).

Установлено, что процесс поступления заявок на использование воздушного пространства в региональные центры ЕС ОрВД описывается пуассоновским законом распределения с параметром λ , а интервалы между поступлениями сообщений подчиняются экспоненциальному распределению. Статистическая проверка гипотезы на основе эмпирических данных Санкт-Петербургского регионального центра за период 2022–2025 гг. (χ^2 -критерий, $p > 0,05$) подтвердила адекватность принятой модели, что позволяет использовать аппарат теории массового обслуживания для прогнозирования загрузки диспетчерского персонала и оптимизации организационной структуры центров ПИВП.

Разработана методика расчета оптимального количества диспетчеров регионального центра на основе формул Хинчина–Поллачека, учитывающая:

- среднюю интенсивность потока заявок $E(n)$;
- среднее время обработки одного сообщения $E(t_s)$;
- вероятность возникновения сбойных ситуаций $P_{СБ}$;
- допустимый уровень загрузки диспетчера $\rho \leq 0,55$ (нормативный) и $\rho \leq 0,70$ (предельный).

Практическая реализация методики для секторов Санкт-Петербургского регионального центра позволила установить критические значения интенсивности заявок:

- при $E(n) \leq 120$ заявок/час достаточно одного диспетчера;
- при $130 \leq E(n) \leq 180$ заявок/час требуется два диспетчера;
- при $E(n) \geq 190$ заявок/час необходимо привлечение третьего диспетчера.

Превышение указанных порогов без корректировки численности персонала приводит к росту вероятности занятости системы ($B > 0,95$) и увеличению среднего времени обработки плана полета, что снижает качество обслуживания пользователей воздушного пространства.

Результаты расчётов (таблица 6) позволяют определить критические точки нагрузки:

Таблица 6 – Зависимость показателей работы диспетчеров ПИВП от интенсивности заявок

$E(n)$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
M	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
B	0,52	0,66	0,75	0,82	0,95	0,49	0,57	0,68	0,72	0,85	0,98	0,50	0,67	0,75
ρ	0,20	0,28	0,35	0,42	0,50	0,19	0,29	0,34	0,42	0,50	0,58	0,21	0,37	0,46

Полученные критические значения $E(n)=120$ (для 1 диспетчера) и $E(n)=180$ (для 2 диспетчеров), при которых система работает на пределе возможностей.

Проведённый факторный анализ (центриодный метод) стандартизированной матрицы X . Выделено четыре латентных фактора, объясняющих 99,6% суммарной дисперсии:

1. **Фактор f_1** (39,4%) – эффективность работы персонала ПИВП (параметры: уровень квалификации, эргатическая сложность, организационная структура);

2. **Фактор f_2** (38,9%) – организационная структура зон ОВД (количество аэродромов, интенсивность полетов, точки пересечения трасс);

3. **Фактор f_3** (12,9%) – уровень автоматизации технологических процессов;

4. **Фактор f_4** (8,4%) – метеорологическая обстановка.

Оценка общности параметров (h_j^2) показала, что наибольшее влияние на эффективность ПИВП оказывают: количество аэродромов гражданской авиации ($h_j^2 = 1,17$), эффективность планирования и координации ($h_j^2 = 1,10$) и количество ведомственных аэродромов ($h_j^2 = 0,98$). Доминирующая роль фактора f_1 подтверждает приоритетность оптимизации организационной структуры и кадровой политики региональных центров.

Доказана эффективность предложенной пятиэтапной процедуры применения разработанных моделей:

1. Формирование системы из 12 ключевых показателей эффективности технологических процессов ПИВП;

2. Расчет значений показателей с использованием статистических данных, нормативных требований и разработанных автором методик (эргатическая сложность, рациональная численность персонала);

3. Стандартизация данных и факторный анализ для выявления скрытых зависимостей;

4. Расчет совокупной целевой функции минимизации затрат с учетом сбойных ситуаций и конфликтных сценариев:

5. Непрерывный мониторинг и оперативная корректировка организационных параметров при изменении внешних условий.

Внедрение разработанных рекомендаций в деятельность Санкт-Петербургского и Хабаровского региональных центров ЕС ОрВД позволило:

- снизить среднее время обработки плана полета на 25%;
- уменьшить вероятность возникновения сбойных ситуаций на 30%;
- оптимизировать штатное расписание диспетчерских смен с учетом прогнозируемой интенсивности воздушного движения;
- повысить качество соблюдения технологических регламентов при сохранении нормативов безопасности полетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований и структурного анализа технологических процессов деятельности персонала центров ПИВП определён основной принцип построения математической модели оценки качества и эффективности обслуживания пользователей воздушного пространства. Модель базируется на минимизации совокупных затрат и учёте эргатической сложности обработки стандартных сообщений, что позволило формализовать воздействие случайных внешних факторов (метеоусловия, технические сбои, задержки), ранее оцениваемых лишь качественно.

В диссертации впервые применён центроидный метод факторного анализа для выявления скрытых зависимостей между разнородными показателями ПИВП. Выделены 4 латентных фактора, объясняющих >99% дисперсии. Установлено, что доминирующим фактором является «эффективность работы персонала ПИВП», ключевым параметром которой выступает организационная структура диспетчерских пунктов.

Разработана методика определения рациональной численности оперативного персонала, основанная на теории массового обслуживания и вероятностном моделировании сбойных ситуаций. Статистическая верификация проведена на реальных данных Санкт-Петербургского и Хабаровского региональных центров ЕС ОрВД за период 2022–2025 гг. Результаты внедрены в производственную деятельность указанных центров и учебный процесс ФГБОУ ВО «СПбГУ ГА им. А.А. Новикова», что подтверждает их высокую практическую значимость и достоверность. Полученные результаты создают научный задел для дальнейшего развития автоматизированных систем поддержки принятия решений и оптимизации кадрового обеспечения ЕС ОрВД в условиях динамической воздушной обстановки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. Гимишян, М. К. Методика анализа загруженности диспетчерского персонала региональных центров с учетом уровня автоматизации систем планирования воздушного движения / М. К. Гимишян // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 3(44). – С. 83–91.

2. Гимишян, М. К. Использование факторного анализа в обеспечении качества обслуживания пользователей воздушного пространства / М. К. Гимишян, С. Л. Олексин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2022. – № 1(34). – С. 79–84.

3. Гимишян, М. К. Методика определения численности диспетчерского персонала ПИВП регионального центра / М. К. Гимишян, С. Л. Олексин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2023. – № 1(38). – С. 90–97.

Публикации в материалах конференций:

1. Гимишян, М.К. Риск-ориентированный подход в государственных стандартах Российской Федерации для обеспечения безопасности полетов при обслуживании воздушного движения/Комиссарова В.Д., Гимишян М.К.//Гражданская авиация: XXI век. Сборник материалов XVIII Международной молодежной научной конференции, посвященной 65-летию первого полета человека в космос и Всемирному дню авиации и космонавтики. В 3-х частях. Ульяновск, 2026. – С. 107-109.

2. Гимишян, М. К. Система риск-менеджмента в авиационной деятельности: структура, стандарты и современные вызовы / В. Д. Комиссарова, М. К. Гимишян // Актуальные вопросы авиационной науки и технологий: Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ульяновск, 29 октября 2025 года. – Ульяновск: Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, 2025. – С. 141-143.

3. Гимишян, М. К. Метод анализа качества планирования воздушного движения / М. К. Гимишян, С. Л. Олексин, Э. В. Шейко // Проблемы современного авиационного образования: сб. материалов междунар. заоч. науч.-метод. конф. – Минск: БГАА, 2018. – С. 84–86.

Печатается в авторской редакции

Подписано к печати 14.07.2026. Формат бумаги 60х90 ^{1/16}

Тираж 100. Усл.печ.л. 1,5. С 43. Заказ 558

Тип. Университета ГА. 196210 Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.38