

На правах рукописи

ТОРОСЯН АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ НОРМАТИВОВ
ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ
НЕЧЁТКОЙ МОДЕЛИ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2026

Работа выполнена на кафедре № 8 «Прикладной математики и информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова)» .

Научный руководитель: **Костин Геннадий Александрович**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры № 8 Прикладной математики и информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Санкт-Петербургский высший государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»

Оппоненты: **Скрыпник Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, Белорусская государственная академия авиации, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте
Попов Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», заместитель начальника подразделения по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», г. Москва

Защита состоится «25» сентября 2026 года в 12:00 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.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова и на сайте:

https://spbguga.ru/files/Dissovet/42.2.002.01/dissertatsiya_TorosyanAA.pdf

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. В условиях роста интенсивности воздушного движения (ВД), расширения практики гибкого использования воздушного пространства (ВП), внедрения свободной маршрутизации и повышения требований к предсказуемости аэронавигационного обслуживания особую значимость приобретает задача оценки и нормирования пропускной способности секторов органов обслуживания воздушного движения (ОВД).

Пропускная способность секторов ОВД формируется под воздействием распределённых во времени и пространстве факторов: геометрии секторов, структуры потоков воздушных судов (ВС), уровня потенциальной конфликтности ВС, интенсивности координаций со смежными органами ОВД, наличия временных и постоянных ограничений использования ВП, метеорологических условий, состояния смежных секторов ОВД, доступности средств наблюдения и автоматизации, а также человеческого фактора. Вследствие этого одинаковое количество ВС в секторе может соответствовать принципиально различной фактической загруженности и разному уровню риска возникновения потенциально конфликтных ситуаций (ПКС).

В контексте Глобального аэронавигационного плана ИКАО (GANP) пропускная способность секторов ОВД выступает одним из ключевых показателей эффективности аэронавигационной системы, связанным с безопасностью, предсказуемостью и рациональным использованием ВП. Поэтому её оценка должна основываться не только на статическом нормативе, но и на учёте текущего состояния воздушной обстановки (ВО), структурной сложности потоков ВС и ограничений использования воздушного пространства (ВП).

Действующие нормативные подходы обеспечивают установление базовых значений пропускной способности диспетчерских пунктов и секторов ОВД, однако в недостаточной степени учитывают краткосрочную изменчивость ВО, структурную сложность потоков ВС и фактическую доступность рабочего объёма ВП при введении ограничений. В этих условиях возникает необходимость разработки метода динамической корректировки нормативной пропускной способности (НПС) секторов ОВД, который дополняет статический норматив оперативным корректирующим контуром.

Поставленная в диссертации научная задача соответствует пункту 9 «Аэронавигационное обеспечение полётов, закономерности процессов навигации, управления движением отдельных воздушных судов и их потоков» и пункту 10 «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач

управления воздушным движением» паспорта научной специальности 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники».

Степень разработанности темы исследования. Общие подходы к оценке пропускной способности элементов аэронавигационной системы, обеспечению безопасности полётов и повышению эффективности ОВД нашли отражение в документах ИКАО, FAA, EUROCONTROL, а также в трудах отечественных и зарубежных исследователей.

Теоретические и методологические проблемы обеспечения безопасности полётов при ОВД, развития системы ОрВД и нормирования пропускной способности зон ОВД отражены в работах: В.И. Алешина, Т.Г. Анодиной, С.М. Богданова, В.М. Брызгалова, Ю.П. Дарымова, В.С. Демьянчука, Г.А. Крыжановского, Е.А. Куклева, Ю.Ю. Михальчевского, С.Г. Пятко, А.П. Плясовских, С.И. Радченко, Л.Е. Рудельсона, Е.С. Соколова, Н.Н. Соколова, Ю.Ф. Цепляева и других специалистов.

В научной и прикладной литературе представлены различные подходы к оценке пропускной способности и загруженности секторов ОВД, однако большинство из них не обеспечивает комплексного и интерпретируемого учёта изменяющихся факторов ВО. В этой связи применение аппарата нечёткой логики является обоснованным, поскольку он позволяет учитывать неопределённость входных параметров и получать объяснимый результат при динамической корректировке нормативной пропускной способности.

Методологические основы нечёткой логики, лингвистических переменных и нечёткого вывода разработаны в трудах: L.A. Zadeh, R.E. Bellman, E.H. Mamdani, S. Assilian, T. Takagi, M. Sugeno, H.-J. Zimmermann, D. Dubois, H. Prade, R.R. Yager, W. Pedrycz, B. Kosko, J.-S.R. Jang и других исследователей. Вместе с тем проблема динамического нормирования пропускной способности диспетчерских секторов ОВД в современных условиях при комплексном учёте объёма ВД, структурной сложности ВО и ограничений доступности ВП не имеет завершённого решения.

Объект исследования. Система организации воздушного движения, процессы обслуживания воздушного движения и методы нормирования пропускной способности секторов ОВД.

Предмет исследования. Методы динамической оценки и корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД.

Цель исследования. Повышение эффективности функционирования системы организации воздушного движения (ОрВД) посредством разработки нового научно

обоснованного метода динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД в рамках положений Глобального аэронавигационного плана ИКАО.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью решены следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность и загруженность секторов ОВД, и обосновать их представление в виде совокупности входных параметров модели.
2. Разработка математической модели динамической корректировки пропускной способности сектора ОВД на основе аппарата нечёткой логики.
3. Разработка метода количественной оценки структурной сложности ВО на основе параметров взаимодействия ВС.
4. Разработка метода учёта ограничений использования ВП при оценке пропускной способности секторов ОВД.
5. Разработка метода корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД.
6. Разработка программного комплекса системы поддержки принятия решений (СППР), реализующего разработанную модель, и выполнение функциональной проверки корректности расчёта коэффициента динамической корректировки НПС на наборе расчётных сценариев.

Научная новизна работы. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Раскрыты несоответствия действующих методик нормирования пропускной способности особенностям состояния секторов ОВД в современных условиях.
2. Предложен новый подход к динамической корректировке пропускной способности секторов ОВД.
3. Введён коэффициент коррекции нормативной пропускной способности секторов ОВД.
4. Разработан метод количественной оценки структурной сложности ВО на основе прогнозируемых ПКС, формируемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов MTCD.
5. Разработан метод учёта ограничений ВП на основе коэффициента доступности ВП, позволяющий формализовать влияние погодных, режимных и иных ограничений на пропускную способность сектора ОВД в рамках единой модели оценки пропускной способности.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость состоит в развитии методов нормирования пропускной способности секторов ОВД за счёт формализации влияния изменяющихся условий ВО на допустимую загрузку секторов ОВД. Полученные результаты расширяют методологические основы оценки пропускной способности и развивают интерпретируемые интеллектуальные методы, применяемые в задачах ОрВД.

Практическая значимость заключается в разработке метода динамической корректировки нормативов пропускной способности секторов ОВД и программного комплекса СППР, реализующего соответствующие алгоритмы. Практически значимыми результатами являются:

- повышение адекватности оценки пропускной способности секторов ОВД в изменяющихся условиях ВО;
- возможность учёта структуры потока ВС и ограничений ВП при принятии оперативных решений;
- возможность использования разработанного подхода в СППР для старших диспетчеров и руководителей полётов (РП);
- возможность адаптации модели к особенностям конкретных секторов ОВД;
- использование результатов диссертационной работы в практике тренажерной подготовки действующих и будущих диспетчеров управления воздушным движением в тренажерных центрах регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург) филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» и ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, теории нечётких множеств и нечёткой логики, теории графов, математической статистики, регрессионного анализа, а также методы компьютерного моделирования и программной реализации алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод динамической корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД на основе аппарата нечёткой логики, позволяющий обеспечить формирование коэффициента коррекции НПС $K_{кор}(t)$ с учётом относительного объёма ВД, структурной сложности ВО и доступности ВП.
2. Метод количественной оценки структурной сложности воздушной обстановки на основе прогнозируемых ПКС, формируемых средствами среднесрочного обнаружения

конфликтов (MTCD), позволяющий учитывать типы взаимодействия ВС, геометрию их конфликтных связей и вертикальную динамику.

3. Метод учёта ограничений использования ВП на основе коэффициента доступности ВП, обеспечивающий корректировку пропускной способности секторов ОВД с учётом метеорологических, режимных и иных ограничений ВП.

4. Алгоритм динамической корректировки нормативной пропускной способности, реализующий возможное адаптивное управление допустимой загрузкой секторов ОВД.

Достоверность полученных результатов. Достоверность подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата нечёткой логики и математической статистики, согласованностью теоретических положений с результатами экспертного оценивания, расчётной апробацией на сценариях районного диспетчерского центра (РДЦ) Санкт-Петербург, а также апробацией результатов исследования в научных публикациях и докладах.

Личный вклад автора. Личный вклад состоит в постановке научной задачи, разработке структуры и математической модели динамической оценки пропускной способности сектора ОВД, формировании базы правил нечёткого вывода, разработке метода оценки структурной сложности воздушной обстановки, организации экспертного исследования, статистической обработке результатов, разработке программного комплекса и выполнении численного моделирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в РДЦ регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург) филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» и на диспетчерском тренажере ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Международной молодежной научно-практической конференции «Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации», Санкт-Петербург, 2023 г.

2. Международной научно-практической конференции «Цифровизация: новые тренды и опыт внедрения», Уфа, 2025 г.

3. III Международной молодежной научно-практической конференции «Актуальные вопросы гражданской авиации: наука, техника и общество», Санкт-Петербург, 2025 г.

4. II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы авиационной науки и технологий», Ульяновск, 2025 г.

5. Международном Авиационном Инновационном форуме (МАИФ-2025), 30.09 - 03.10, Санкт-Петербург, 2025 г.

6. III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные тенденции и проблемы подготовки специалистов транспорта», Ульяновск, 2025 г.

7. II Международной молодежной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых «Гражданская авиация в условиях глобальных изменений: наука и практика», Москва, 2026 г.

8. Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию МГТУ ГА «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Москва, 2026 г.

Публикации результатов. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 10 научных публикациях, в том числе в 4 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и в 6 публикациях, индексируемых в РИНЦ. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2026665072 от 20.05.2026 и №2026665870 от 26.05.2026.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 197 страниц текста. Работа содержит 20 рисунков, 21 таблицу. Список литературы включает 154 наименования. Приложения на 7-ми страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, раскрыта степень разработанности научной проблемы, определены объект, предмет, цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы нормирования пропускной способности в системах организации воздушного движения. Показано, что пропускная способность секторов ОВД является одним из ключевых показателей функционирования аэронавигационной системы и должна рассматриваться во взаимосвязи с

безопасностью полётов, задержками, предсказуемостью и эффективностью использования воздушного пространства.

Проанализированы документы ИКАО, EUROCONTROL и FAA, включая подходы, связанные с глобальным аэронавигационным планированием, управлением потоками воздушного движения и пропускной способностью, мониторингом загрузки сектора, оценкой рабочей нагрузки диспетчера УВД и применением показателей сложности воздушной обстановки. Отмечено, что международная практика всё в большей степени ориентируется на переход от жёстких статических ограничений к динамическим оценкам состояния загруженности воздушного пространства.

В отечественной практике расчёт НПС диспетчерских пунктов и секторов ОВД основан на регламентированной методике (Приказ ФАВТ №757 от 07.11.2012), задающей базовую нормативную величину. Такой подход сохраняет значение как нормативная основа планирования, однако не предназначен для оперативного учёта краткосрочных изменений ВО. Наиболее существенными факторами указанной изменчивости являются относительный объём ВД, структурная сложность взаимодействия ВС и ограничения доступности ВП.

Во второй главе диссертационной работы разработан метод динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД на основе гибридной нечёткой модели. Разрабатываемая система формализована как система нечёткого вывода типа Мамдани:

$$FIS = \langle X, Y, \mathcal{T}, \mathcal{B}, \mathcal{M} \rangle, \quad (1)$$

где X – множество входных переменных; Y – множество выходных переменных; $\mathcal{T}$ – совокупность лингвистических термов и соответствующих функций принадлежности; $\mathcal{B}$ – база продукционных правил; $\mathcal{M}$ – механизм нечёткого вывода.

Множество X представлено в виде вектора входных переменных модели, включающего совокупность параметров, характеризующих состояние сектора ОВД:

$$X_s(t) = V_s(t), C_s(t), R_s(t), \quad (2)$$

где $V_s(t)$ – относительный объём воздушного движения; $C_s(t)$ – индекс структурной сложности воздушной обстановки; $R_s(t)$ – коэффициент доступности воздушного пространства. Указанные параметры имеют различную физическую природу, однако в совокупности отражают количественную загрузку, конфликтно-структурную насыщенность и фактические ограничения рабочего объёма ВП сектора ОВД.

Входная переменная V характеризует относительный объём ВД. Она выражается в процентах от нормативной пропускной способности сектора ОВД. Это позволяет применять

модель к секторам ОВД с различными абсолютными НПС, поскольку расчёт ведётся не в абсолютном числе ВС, а в относительной шкале. Для переменной V выделены режимы (термы): «низкий, оптимальный, высокий и перенасыщенный», характеризующие загрузку сектора ОВД.

Входная переменная C отражает структурную сложность ВО и характеризуется соответствующим терм-множеством: «линейная, смешанная, высокая». Её введение позволяет устранить ключевой недостаток подхода, при котором одинаковое количество ВС автоматически считается одинаковой нагрузкой. В действительности простое присутствие ВС в секторе ОВД и наличие прогнозируемых потенциально конфликтных ситуаций создают различную нагрузку диспетчера УВД. Поэтому C выделена в самостоятельную переменную и рассчитывается независимо от V , что предотвращает смешение количественной загрузки и структурной сложности ВО.

Входная переменная R характеризует доступность ВП и описывается следующим терм-множеством степени ограничений ВП: «полные, частичные, отсутствуют». Она необходима потому, что даже при умеренной загрузке и невысокой конфликтности ВД фактическая возможность безопасного ОВД может резко снижаться при сокращении доступного объёма ВП сектора ОВД. Введение R позволяет формализовать воздействие ограничений ВП, не сводя их к бинарной логике «есть ограничение – нет ограничения». Вместо этого используется непрерывный коэффициент доступности ВП, позволяющий учесть степень сокращения рабочего объёма ВП сектора ОВД.

Множество Y состоит из выходной переменной модели – коэффициента коррекции $K_{кор,s}(t) = y$, определяющего долю НПС, которую целесообразно использовать при текущем состоянии сектора ОВД. Лингвистические термы, отражающие уровень воздействия выходной переменной на НПС и описывающие состояние функционирования сектора ОВД, определены терм-множеством: «закрытие, уменьшенная, сниженная, максимальная».

Динамическая оценка пропускной способности определяется выражением:

$$\mu_s(t) = \mu_{норм,s} \cdot K_{кор,s}(t), \quad (3)$$

где $\mu_s(t)$ – динамическая скорректированная пропускная способность сектора s в момент времени t ; $\mu_{норм,s}$ – нормативная пропускная способность сектора; $K_{кор,s}(t)$ – коэффициент динамической коррекции нормативной пропускной способности.

Разработанная база знаний нечёткой модели содержит 36 продукционных правил, соответствующих декартову произведению терм-множеств входных переменных. Такая структура обеспечивает полноту покрытия пространства входных состояний. Важной

особенностью базы правил является наличие консервативной логики безопасности: при критически низкой доступности ВП результат модели определяется, прежде всего, ограничениями, даже если объём воздушного движения и структурная сложность формально не достигают предельных значений.

В общем виде правила записываются следующим образом:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } (V_s(t) \text{ есть } A_i) \wedge (C_s(t) \text{ есть } B_j) \wedge (R_s(t) \text{ есть } D_l) \Rightarrow (y \text{ есть } Z_m), \quad (4)$$

где A_i , B_j и D_l – термы входных переменных V , C и R соответственно; Z_m – терм выходной переменной; $k = 1 \dots 36$ – номер продукционного правила. Наличие полной базы правил исключает области неопределённости и обеспечивает формирование результата для любой допустимой комбинации входных параметров.

В работе показано, что модель Мамдани предпочтительна для рассматриваемой задачи по сравнению с не полностью предсказуемыми алгоритмами машинного обучения. Хотя нейросетевые модели могут демонстрировать высокую точность при наличии больших выборок, их применение в задачах обеспечения безопасности полётов ограничивается трудностью объяснения результата. Нечёткая модель, напротив, позволяет показать, какие входные термы были активированы, какие правила сработали и каким образом сформирован итоговый коэффициент коррекции НПС.

Для фаззификации входных переменных использован гибридный набор функций принадлежности. Трапецеидальные функции применяются для описания областей устойчивого штатного функционирования, гауссовы функции – для зон плавного перехода и областей оптимума, S- и Z-образные функции – для описания нарастающих или убывающих критических состояний. Для гауссовой функции принадлежности используется выражение:

$$\mu(x; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(u - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где c – центр функции принадлежности; σ – параметр ширины функции. Введение гауссовых функций позволяет приближённо описать нелинейный характер изменения операционной нагрузки при приближении параметров к критическим значениям.

Параметрический синтез функций принадлежности выполнен с опорой на экспертные оценки опытных специалистов ОВД. Такой подход позволяет избежать произвольного назначения границ термов и обеспечивает связь математической модели с профессиональным опытом действующих специалистов ОВД. Особенно важны полученные экспертным путём границы комфортной загрузки сектора ОВД, критической сложности ВО и порога доступности

ВП, при котором дальнейшее увеличение входящего в сектор ОВД потока ВС становится недопустимым.

Для каждого правила базы знаний рассчитывается степень его активации. При использовании логической связки «И» степень активации определяется Т-нормой минимума:

$$\alpha_k = \min \left(\mu_{A_i}(V_s), \mu_{B_j}(C_s), \mu_{D_l}(R_s) \right), \quad (6)$$

где α_k – степень активации k -го правила; $\mu_{A_i}(V_s), \mu_{B_j}(C_s), \mu_{D_l}(R_s)$ – степени принадлежности входных значений соответствующим входным термам.

С целью объединения вкладов активированных правил в единое результирующее нечёткое множество выполняется агрегирование результатов всех активированных правил по схеме Мамдани:

$$\mu_{\Sigma}(y) = \max_{k=1, \dots, 36} \left(\mu'_{R_k}(y) \right), \quad y \in U_Y, \quad (7)$$

где $\mu_{\Sigma}(y)$ – агрегированная выходная функция принадлежности; $\mu'_{R_k}(y)$ – функция принадлежности выходного терма, связанного с k -м правилом.

Для преобразования результирующего нечёткого множества в чёткое значение входной переменной применяется дефаззификация методом центра тяжести:

$$K_{\text{кор},s}(t) = y = \frac{\int_{U_Y} y \cdot \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int_{U_Y} \mu_{\Sigma}(y) dy} \quad (8)$$

Центроидный метод учитывает вклад всех активированных правил, обеспечивает непрерывный характер выходной функции и уменьшает вероятность скачкообразного изменения рекомендаций. Это особенно важно для СППР, используемой в задачах, связанных с обеспечением безопасности полётов.

В модели реализован принцип приоритетного учёта ограничений воздушного пространства. База правил реализует консервативную логику принятия решения, в том числе приоритетный учёт существенных ограничений доступности воздушного пространства. Для значения $R_s(t) \leq 0,25$ предусмотрено резкое снижение допустимой загрузки сектора независимо от значений других входных параметров. При критически низком значении доступности ВП срабатывает группа правил, переводящая сектор ОВД в режим жёсткого снижения пропускной способности или закрытия для входа новых ВС независимо от значений V и C :

$$\text{ЕСЛИ } R \text{ есть } \{\text{Полные}\}, \text{ ТО } y \text{ есть } \{\text{Закрытие}\}, \quad \forall V, C \quad (9)$$

Тем самым в модели обеспечивается приоритет безопасности полётов над стремлением сохранить нормативную пропускную способность в условиях значительного снижения доступности ВП сектора ОВД (например, при введении ограничений, сигнал «Ковёр»).

В третьей главе диссертации выполнена программная реализация предлагаемого метода, проведено численное моделирование и сравнительный анализ полученных результатов. Разработан программный прототип СППР, реализующий загрузку входных профилей, нормализацию входных данных, фаззификацию, нечёткий вывод, дефаззификацию и визуализацию результатов. Программный комплекс построен как модульная система, в которой каждый входной параметр формируется отдельным информационным контуром, а нечёткая модель выполняет функцию интегрального агрегатора. Такая архитектура повышает проверяемость модели, поскольку расчёт V , C и R может быть независимо проконтролирован и уточнён без изменения общей базы правил.

Алгоритм работы СППР «Нечёткая модель динамической коррекции НПС секторов ОВД» показан рисунке 1.

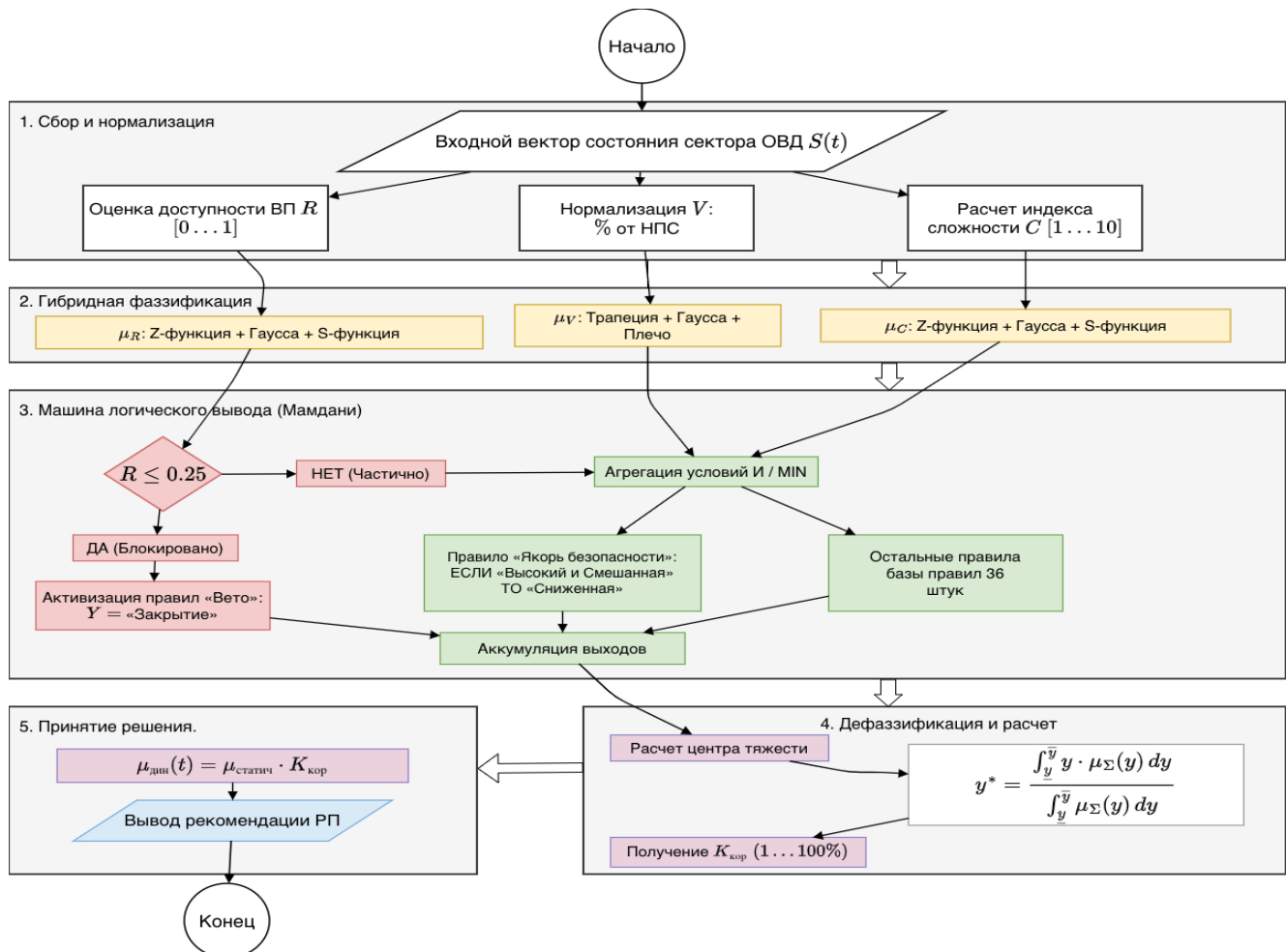


Рисунок 1 – Алгоритм работы «Нечёткая модель динамической коррекции НПС секторов ОВД»

Модуль нормализации обеспечивает приведение входных параметров к согласованным универсальным множествам. Это необходимо, поскольку объём ВД измеряется в процентах от НПС, сложность задаётся индексом 0-10, а доступность ВП выражается в долях единицы. Без нормализации применение единого механизма фаззификации было бы методически некорректным. В результате нормализации формируется вектор состояния, передаваемый в блок гибридной фаззификации.

Блок фаззификации преобразует чёткие численные значения в степени принадлежности термам. Использование гибридного набора функций принадлежности позволяет описать различные физические и операционные свойства входных переменных. Трапецеидальные функции применяются в устойчивых областях, где изменение параметра не должно вызывать резкой реакции. Гауссовы функции применяются для зон оптимума и переходных областей. S- и Z-образные функции используются для описания монотонного роста или убывания степени принадлежности критическим режимам.

Упрощенная архитектура программного комплекса СППР представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Информационный контур расчёта динамической корректировки пропускной способности сектора ОВД

Одной из ключевых задач программной реализации является расчёт индекса структурной сложности $C_s(t)$. В основу алгоритма положено представление воздушной обстановки в виде множества прогнозируемых потенциальных конфликтных ситуаций, каждая из которых характеризуется типом геометрического взаимодействия ВС, длительностью существования и признаком вертикального маневрирования ВС.

Для экспертной калибровки весовых коэффициентов структурной сложности использована процедура обработки оценок 30 специалистов ОВД. Экспертам предлагались обезличенные сценарии для оценки сложности ВО по десятибалльной шкале. По результатам

обработки экспертных оценок была решена переопределённая система линейных уравнений методом наименьших квадратов, определён вектор весов сложности ВО:

$$w = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (10)$$

где X – матрица параметров сценариев; Y – вектор усреднённых экспертных оценок; $w = (\alpha, \beta, \gamma)^T$ – вектор искомых весовых коэффициентов.

Получены значения: $\alpha \approx 0,78$ – характеризует нахождение ВС в секторе ОВД и отсутствие конфликтного взаимодействия; $\beta \approx 1,76$ – отражает вклад конфликтного взаимодействия между ВС в горизонтальном полёте; $\gamma \approx 1,25$ – показывает вклад вертикальной динамики ВС в интегральную оценку сложности ВО. В итоговый индекс структурной сложности ВО непосредственно включаются β и γ , поскольку коэффициент α , соответствующий базовой нагрузке ОВД (количеству ВС в секторе ОВД), в итоговой формуле не используется. В разработанной модели общий объём ВС учитывается отдельной входной переменной $V_s(t)$. Поэтому, сохранение коэффициента, связанного с α , в составе индекса $C_s(t)$ привело бы к двойному учёту одного и того же фактора – интенсивности ВД.

Алгоритм оценки структурной сложности реализован на основе прогнозируемых ПКС. Каждая ПКС рассматривается как связь между двумя ВС в динамическом графе воздушной обстановки. Такая интерпретация позволяет перейти от разрозненного перечня конфликтов к агрегированной характеристике структуры потока. При этом учитываются тип сближения, длительность существования конфликтной связи и вертикальное маневрирование участников конфликтной пары ВС. В работе рассматривались следующие типы ПКС, формируемых программным средством комплекс имитационного моделирования (КИМ) ОрВД (авторы – ФАУ «ГосНИИ АС»):

C1 – пересечение двух ВС с нулевой вертикальной скоростью (с постоянной высотой);

C2 – пересечение двух ВС, одно из которых имеет ненулевую вертикальную скорость, в то время как другое сохраняет высоту;

C3 – пересечение двух ВС, имеющих ненулевые вертикальные скорости;

C4 – догон одного ВС другим, оба ВС имеют ненулевую вертикальную скорость;

C5 – догон одного ВС другим, одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, а второе сохраняет высоту;

C6 – догон одного ВС другим, оба ВС имеют ненулевые вертикальные скорости;

C7 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами, имеющими нулевые вертикальные скорости;

С8 - конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами, при этом одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, второе сохраняет высоту;

С9 - конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами с ненулевыми вертикальными скоростями.

Для учёта длительности существования ПКС введён вес временного присутствия конфликтной ситуации в окне агрегации:

$$\omega_D(D_i(t)) = \min\left(\frac{D_i(t)}{\Delta T}, 1\right), \quad (11)$$

где D_i – длительность i -й потенциально конфликтной ситуации; ΔT – горизонт прогнозирования и окно агрегации. Горизонт ΔT принят равным 20 минутам.

Для сектора s формируются нормированные горизонтально-конфликтная ($\tilde{S}_{\text{конфл},s}(t)$) и вертикальная ($\tilde{S}_{\text{верт},s}(t)$) компоненты сложности, итоговый индекс рассчитывается как:

$$C_s(t) = 10 \cdot \min\left(1, \frac{\beta \tilde{S}_{\text{конфл},s}(t) + \gamma \tilde{S}_{\text{верт},s}(t)}{\beta + \gamma}\right), \quad (12)$$

где $\tilde{S}_{\text{конфл},s}(t)$ – нормированная горизонтально-геометрическая компонента сложности; $\tilde{S}_{\text{верт},s}(t)$ – нормированная вертикальная компонента сложности; β и γ – весовые коэффициенты, полученные по результатам экспертной калибровки. Таким образом, индекс $C_s(t)$ отражает не просто количество ВС, а структурную насыщенность ВО и конфликтность взаимодействий ВС.

Отдельным результатом учёта ограничений ВП является разработанная методика расчёта коэффициента доступности ВП $R_s(t)$, основанная на сеточной дискретизации горизонтальной проекции сектора и вертикальном делении рабочего объёма ВП на эшелонные слои. В отличие от описательного указания на наличие ограничений, предложенный подход позволяет количественно оценить долю доступного объёма ВП сектора ОВД. Горизонтальная проекция сектора разбивается на расчётные ячейки, а по вертикали вводится система эшелонных слоёв. Для каждой ячейки и каждого слоя вводится бинарный признак доступности $a_{i,l}(t)$. Коэффициент доступности ВП сектора ОВД определяется выражением:

$$R(t) = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}\left((c_i^S) \cdot \Delta h \cdot a_{i,l}(t)\right)}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}(c_i^S) \Delta h}, \quad (13)$$

где: $R(t) \in [0, 1]$ – коэффициент доступности ВП сектора в момент времени t ; $m_{\text{сек}}(c_i^S)$ – площадь внутрисекторной части i -й ячейки; $a_{i,l}(t)$ – индикатор доступности элементарной области; Δh – толщина эшелонного слоя; L – число вертикальных слоёв; N – число расчётных ячеек.

В упрощенном виде выражение записывается как:

$$R(t) \approx \frac{1}{NL} \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N a_{i,l}(t), \quad (14)$$

где N – число расчётных ячеек внутри сектора; L – число вертикальных слоёв; $a_{i,l}(t)$ принимает значение 1, если ячейка i в слое l доступна, и 0, если она блокируется активным ограничением. Значение $R(t) = 1$ соответствует полной доступности ВП, а снижение $R(t)$ отражает уменьшение доступного объёма ВП сектора ОВД.

Для параметрического синтеза функций принадлежности проведён экспертный опрос 30 специалистов ОВД. Экспертам предлагалось определить реперные точки лингвистических термов: наиболее вероятного проявления свойства ($P_{\text{опт}}$), точку максимального соответствия (P_{max}) и границу исчезновения свойства (P_{min}). Центр функции принадлежности определялся как среднее арифметическое экспертных оценок:

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{\text{опт}}^{(i)} \quad (15)$$

Ширина гауссовой функции принадлежности определялась по правилу ширины на полувысоте:

$$\sigma \approx \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2,355} \quad (16)$$

По результатам обработки экспертных оценок получены параметры функций принадлежности, согласующиеся с выбранными при моделировании значениями: для оптимальной загрузки сектора $c \approx 60,1$ %, для высокой загрузки получено значение $c \approx 85,1$ %, для критической сложности ВО $a \approx 6,1$, для порога закрытия ВП, вызванного ограничениями $R \approx 0,25$. Полученные результаты подтверждают эмпирическую обоснованность исходных параметров нечёткой модели.

Проведённое численное моделирование показало, что разработанная нечёткая модель формирует непрерывные и интерпретируемые поверхности решений на исследованной области входных параметров. При изменении входных параметров модель не формирует необоснованных скачков выходного коэффициента. Это особенно важно для СППР, поскольку резкие изменения рекомендации при малом изменении входных данных могут снизить доверие пользователя к системе и затруднить её практическое применение. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 3.

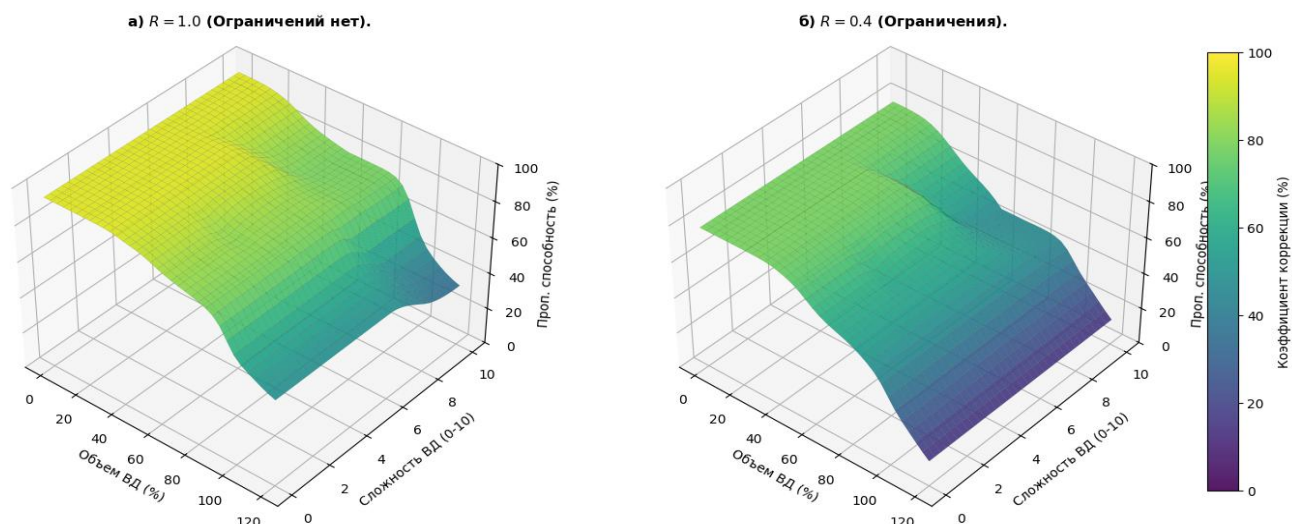


Рисунок 3 – Результаты численного моделирования поверхности решений а) $R = 1,0$; б) $R = 0,4$

Топологический анализ поверхностей решений подтвердил, что модель корректно отражает заложенные стратегии. При высокой доступности ВП сектора ОВД и невысокой сложности ВО коэффициент коррекции сохраняется в максимальной области. При увеличении сложности ВО или загрузки сектора ОВД значение коэффициента постепенно снижается.

При резком уменьшении доступности ВП сектора возникает доминирующее влияние параметра R , что соответствует требованиям безопасности, и срабатывает правило (выражение 9) режима снижения пропускной способности сектора ОВД или закрытия для входа новых ВС в условиях фактического сокращения рабочего объема ВП сектора.

В четвертой главе разработана методика верификации, экспертной оценки и параметрической адаптации нечёткой модели динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД. Расчётная апробация выполнена на обезличенных сценариях для секторов РДЦ Санкт-Петербург: «Север», «Юго-Восток» и «Юго-Запад». Каждый сценарий включал временные профили $V_s(t)$, $C_s(t)$, $R_s(t)$ и рассчитанные значения $K_{кор,s}(t)$.

В связи с отсутствием открытого нормативного эталонного ряда динамической пропускной способности основное внимание уделено функциональной верификации программной реализации, экспертной оценке выходных режимов и проверке согласованности результатов модели с профессиональными оценками специалистов ОВД. Такой подход обусловлен тем, что фактические оперативные данные и материалы ограничений ВП могут относиться к информации ограниченного распространения.

Интерфейс разработанного программного модуля нечёткой модели динамической корректировки НПС секторов ОВД представлен на рисунке 4.

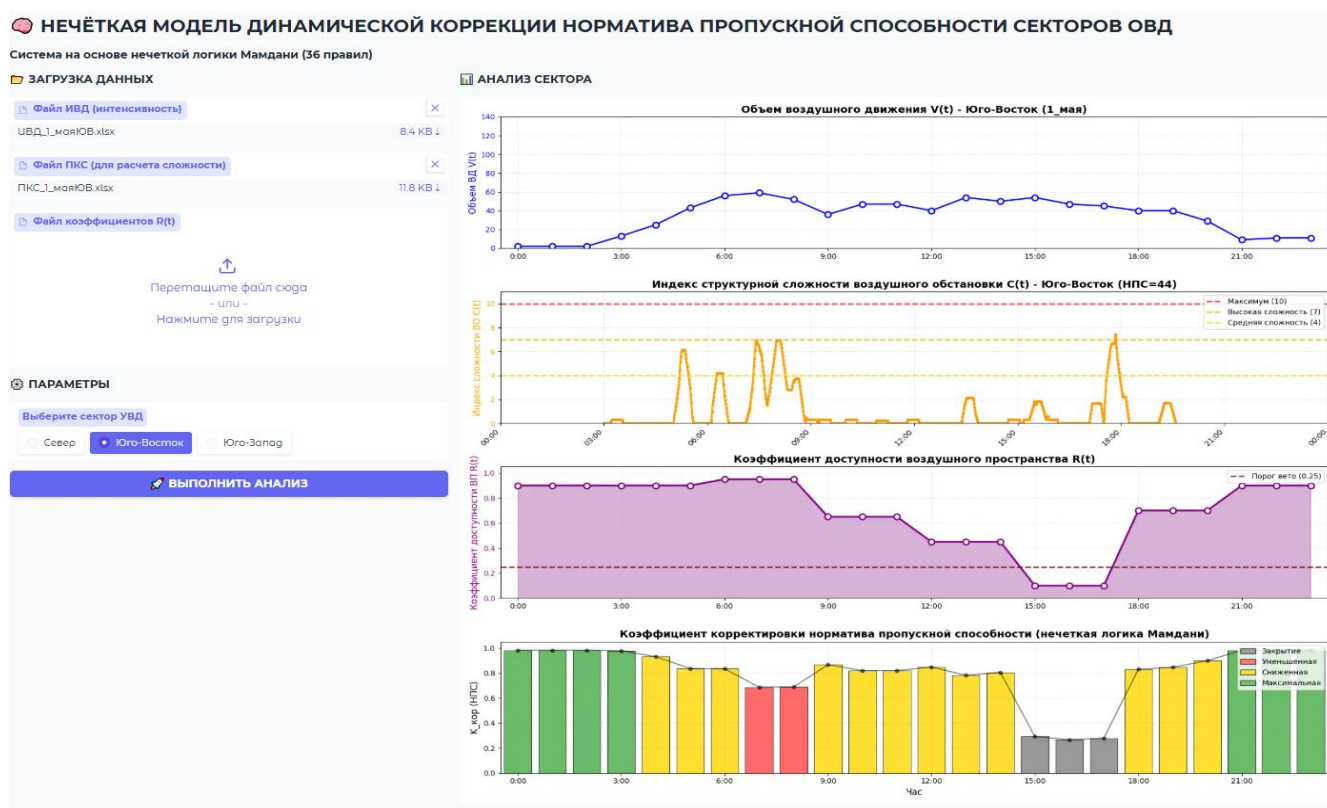


Рисунок 4 – Интерфейс модуля нечёткой модели динамической корректировки НПС секторов ОВД

Загрузка данных ИВД, ПКС/MTCD и коэффициента ограничений доступности ВП в реализованный программный модуль производится отдельными файлами. В программной реализации коэффициент $R_s(t)$ формируется как предварительно вычисленный входной временной профиль, рассчитываемый специализированным программным средством «Программный модуль расчёта коэффициента доступности воздушного пространства секторов обслуживания воздушного движения», который распознает графические объекты с ограничениями ВП, а также контурами опасных метеорологических явлений, которые приняты в расчет в программной реализации модуля. Пример распознавания графических объектов модулем показан на рисунке 5.

Работа программного модуля включает загрузку исходного изображения, определение областей ограничений, морфологическую обработку полученных контуров, их наложение на границы секторов и расчёт коэффициента $R_s(t)$ для каждого сектора ОВД. Результатом обработки является расчёт коэффициента доступности ВП для загрузки в модуль нечёткой модели динамической корректировки НПС секторов ОВД.

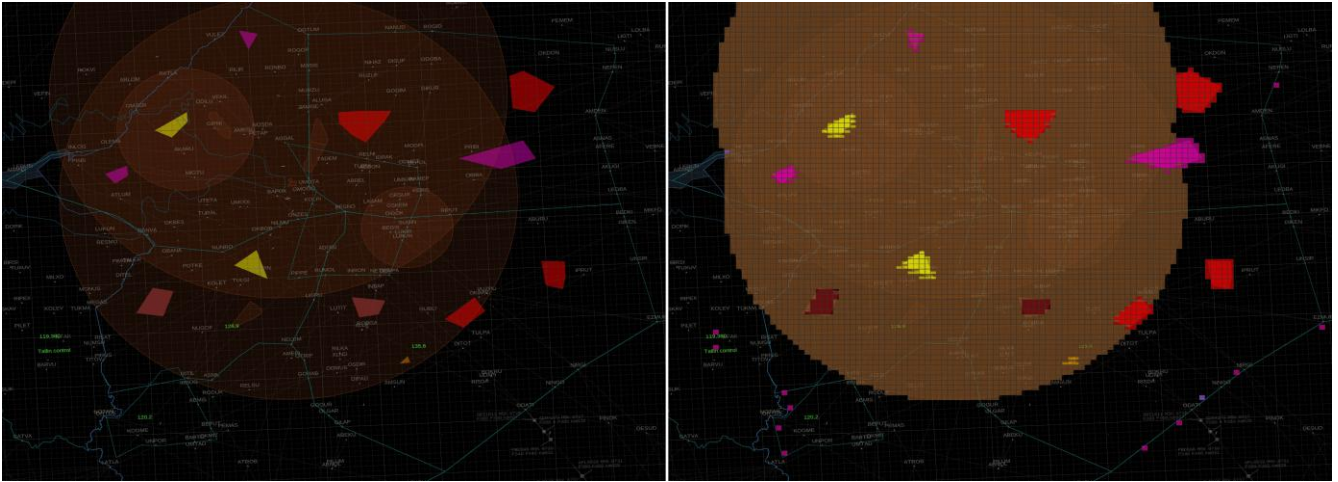


Рисунок 5 – Пример распознавания графической информации с ограничениями ВП и контурами неблагоприятных явлений погоды

Для экспертной оценки результатов модели предложена категориальная шкала режимов выходного терм-множества: «максимальная», «сниженная», «уменьшенная», «закрытие». Согласованная экспертная оценка по каждому временному окну определяется по правилу большинства:

$$E^*(t) = \text{mode}\{E_1(t), E_2(t), \dots, E_M(t)\}, \quad (17)$$

где $E^*(t)$ – согласованная экспертная классификация состояния сектора; $E_M(t)$ – индивидуальная оценка m -го эксперта; M – число экспертов; mode – наиболее часто встречающийся класс среди экспертных оценок.

Для характеристики устойчивости экспертного решения используется показатель согласованности:

$$A(t) = \frac{\max_k n_k(t)}{M}, \quad (18)$$

где $n_k(t)$ – число экспертов, выбравших класс k ; M – общее число экспертов. Результат модели также переводится в категориальный класс, после чего рассчитывается доля совпадений с согласованной экспертной оценкой:

$$P_{\text{совп}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n I(\hat{E}(t) = E^*(t)), \quad (19)$$

где $\hat{E}(t)$ – класс, сформированный нечёткой моделью; $E^*(t)$ – согласованный экспертный класс; $I(\cdot)$ – индикатор совпадения.

Интегральные показатели согласованности модели и экспертной оценки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные показатели согласованности модели и экспертной оценки

Показатель	Значение	Интерпретация
Доля совпадений $P_{совп}$	0,944	высокое совпадение модели с экспертной классификацией
Средняя согласованность экспертов A	0,89	устойчивая групповая экспертная оценка
Среднее отклонение рангов D_r	0,06	расхождения преимущественно между соседними классами
Грубые противоречия классов	0	критические расхождения отсутствуют

Сопоставление результатов модели с экспертной классификацией показало высокую степень согласованности; расхождения преимущественно относились к соседним классам, что соответствует переходным областям функций принадлежности.

Проведён сравнительный анализ разработанного метода с нормативной методикой. Установлено, что нормативная методика решает задачу определения базового значения пропускной способности секторов, а разработанная нечёткая модель решает дополнительную задачу оперативной корректировки этого значения с учётом текущих условий ВО. Поэтому предложенная модель не заменяет нормативную методику, а формирует над ней динамический корректирующий контур.

Сформулированы рекомендации по практическому внедрению модели в состав СППР ОВД. Программный модуль должен использоваться не как автономное средство ОВД, а как человеко-ориентированный информационно-аналитический инструмент, предоставляющий диспетчеру, старшему диспетчеру или РП интерпретируемую оценку пропускной способности, зависящую от текущего состояния секторов ОВД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы достигнута цель исследования, направленная на повышение эффективности функционирования системы ОрВД в рамках положений Глобального аэронавигационного плана ИКАО, и решена актуальная научная задача разработки нового научно обоснованного метода динамической корректировки НПС секторов ОВД на основе нечёткой модели. Получены следующие новые научные результаты:

1. Проведён анализ существующих отечественных и зарубежных подходов к определению пропускной способности секторов ОВД и показана необходимость дополнения статического норматива динамическим корректирующим контуром.

2. Обоснована структура вектора состояния среды сектора ОВД, включающего $V_s(t), C_s(t), R_s(t)$.

3. Разработан метод расчёта индекса структурной сложности ВО на основе прогнозируемых ПКС, их геометрии, длительности и вертикальной динамики;

4. Разработан метод расчёта коэффициента доступности ВП на основе сеточной дискретизации сектора и оценки доли доступного объёма ВП.

5. Разработана нечёткая модель динамической корректировки НПС секторов ОВД на основе алгоритма Мамдани и базы из 36 продукционных правил.

6. Выполнен параметрический синтез функций принадлежности на основе экспертного опроса 30 специалистов ОВД.

7. Разработана программная реализация нечёткой модели в виде прототипа СППР.

8. Выполнена расчётная апробация модели на обезличенных сценариях для секторов РДЦ Санкт-Петербург, а также проведена экспертная оценка результатов модели.

9. Проведён сравнительный анализ с нормативной методикой и показано, что разработанная модель дополняет нормативный подход динамическим механизмом корректировки НПС.

Применение полученных в работе результатов позволяет:

1. Осуществлять динамическую корректировку НПС секторов ОВД с учётом текущего состояния ВО и доступности ВП.

2. Выявлять ситуации, в которых при умеренном количестве ВС фактическая сложность ОВД возрастает вследствие конфликтной структуры потоков ВС, их вертикальных манёвров или ограничений ВП.

3. Предотвращать завышение допустимой загрузки сектора ОВД при существенном сокращении доступного объёма ВП.

4. Использовать НПС не как неизменяемую величину, а как базовый параметр, подлежащий оперативной корректировке в зависимости от текущего состояния сектора ОВД.

5. Применять разработанный программный модуль в составе СППР для анализа сценариев загрузки сектора ОВД, оценки последствий ограничений ВП и информационной поддержки старшего диспетчера или РП.

Направления дальнейших исследований:

1. Интеграция программного модуля с источниками данных автоматизированных систем УВД, средствами МТСД и модулем расчёта доступности ВП.

2. Проведение опытной эксплуатации программного модуля в режиме информационной поддержки планирования загрузки секторов ОВД.

3. Разработка регламентов применения динамической корректировки пропускной способности в составе СППР с учётом требований безопасности полётов, человеко-ориентированного проектирования и сохранения ведущей роли диспетчера УВД при принятии решений.

Полученные результаты создают научно-методическую основу для дальнейшего развития средств динамической оценки пропускной способности секторов ОВД и могут быть использованы при совершенствовании СППР в районных диспетчерских центрах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации (4):

1. **Торосян, А. А.** Метод расчёта динамической оценки пропускной способности воздушного пространства на основе нечётких моделей / **А. А. Торосян** // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2026. – № 54. – С. 43-53.

2. **Торосян, А. А.** Метод расчета индекса структурной сложности воздушного пространства секторов РДЦ на основе ПКС (MTCD)/ **А. А. Торосян, Н. Е. Баранов** // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2026. – Том 13. – №02. С. 28-42.

3. **Торосян, А. А.** Алгоритмические основы расчета динамической пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения на основе гибридной нечеткой логики / **А. А. Торосян, Т. В. Шевченко, Д. О. Тарасов** // Вестник СПбГУ ГА. – 2026. – № 1. – С. 58-67. – EDN RCEGLV.

4. **Торосян, А. А.** Метод динамической коррекции пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения с использованием аппарата нечёткой логики / **А. А. Торосян, Г.А. Костин** // Вестник СПбГУ ГА. – 2026. – № 2. – С. 25-39.

Публикации в других изданиях и материалах конференций (6):

1. Петухов, Г. М. Возрастающая роль влияния технологий искусственного интеллекта на трансформацию образования / Г. М. Петухов, **А. А. Торосян**, А. Д. Бородин // Современ. тенденции и проблемы подготовки спец. трансп. : Сб. материалов III Всероссийской научно-практич. конф. с междунар. уч., Ульяновск, 29 октября 2025 г. – Ульяновск: УИ ГА им. Б.П. Бугаева, 2025. – С. 109-113. – EDN WBWXIS.

2. Грачева, А. Н. Концепция динамической секторизации воздушного пространства (DAC - dynamic airspace configuration): потенциальные преимущества и проблемы внедрения / А. Н.

Грачева, **А. А. Торсян** // Актуальные вопросы авиац. науки и технологий : Сб. материалов II Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. уч., Ульяновск, 29 октября 2025 г. – Ульяновск: УИ ГА им. Б.П. Бугаева, 2025. – С. 67-69.

3. Петухов, Г. М. Анализ отклонений в работе глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) / Г. М. Петухов, **А. А. Торсян** // Актуальные вопросы гражд. авиац.: наука, техника и общ-во : Сб. материалов III Междунар. молодежной науч.-практ. конф., СПб, 27–28 марта 2025 года. – СПб: СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, 2025. – С. 304-307. – EDN PHSTRR.

4. **Торсян, А. А.** Двухконтурная модель динамической оценки пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения / **А. А. Торсян** // Гражд. авиац. в условиях глобальных изменений: наука и практика : Сб. материалов II Междунар. молодежной научно-практ. конф. аспирантов и молодых уч., Москва, 8.04.2026 – М.: МГТУ ГА, 2026. – С. 165-172.

5. **Торсян, А. А.** Метод оперативной коррекции нормативной пропускной способности сектора ОВД / **А. А. Торсян** // Гражд. авиац. на современном этапе развития науки, техники и общ-ва : Сб. тез. док. Междунар. научно-техн. конф., посвященной 55-летию МГТУ ГА, Москва, 20-21 мая 2026 года. – М.: МГТУ ГА, 2026. – С. 272-274.

6. **Торсян, А. А.** Обучаемый нейро-нечёткий модуль оперативной коррекции нормативной пропускной способности сектора ОВД / **А. А. Торсян** // Гражд. авиац. на современном этапе развития науки, техники и общ-ва : Сб. тез. док. Междунар. научно-техн. конф., посвященной 55-летию МГТУ ГА, Москва, 20-21 мая 2026 г. – М.: МГТУ ГА, 2026. – С. 274-276.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (2)

1. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2026665072 РФ. Нечёткая модель динамической коррекции нормативов пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения: заявл. 04.05.2026: опубл. 20.05.2026 / **А. А. Торсян**, Н. Е. Баранов, Т. В. Шевченко, Д. О. Тарасов.

2. Св-во о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2026665870 РФ. Программный модуль расчёта коэффициента доступности воздушного пространства секторов обслуживания воздушного движения: заявл. 11.05.2026: опубл. 26.05.2026/ **А. А. Торсян**, Н. Е. Баранов, Т. В. Шевченко, Г. А. Зюзин.

Печатается в авторской редакции

Подписано к печати 14.07.2026 г. Формат бумаги 60×90 1/16.

Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1,5. С 44. Заказ 559.

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