

УДК 351.814.33

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-38-52

Оптимизация захода на посадку в районе полетной информации Москвы: эколого-экономическая оценка внедрения процедуры непрерывного снижения

Д.А. Мозжухин¹, В.Н. Нечаев², Р.А. Субботин²

¹Московский центр автоматизированного управления воздушным движением,
г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В условиях роста воздушного движения важным становится внедрение экологичных и экономичных технологий в гражданской авиации. Одним из перспективных решений является режим непрерывного снижения (Continuous Descent Operations, CDO), обеспечивающий оптимальную траекторию снижения с уменьшением расхода топлива, выбросов CO₂ и шума вблизи аэропортов. В исследовании разработана аналитическая модель оценки эффективности внедрения CDO в Московском районе полетной информации, учитывающая оптимизацию диспетчерского управления и организацию воздушного пространства. Методология включает математическое моделирование, экспертный и имитационный анализ. Предложены алгоритмы мультифакторной оценки влияния плотности трафика, особенностей диспетчерского регулирования и метеоусловий на применение CDO. Результаты могут использоваться для формирования регламентов и схем воздушного движения в Московской зоне, способствуя снижению топливных затрат и экологическому улучшению в соответствии с планом ИКАО на 2016–2030 годы.

Ключевые слова: режим непрерывного снижения, оценка эффективности, обслуживание воздушного движения.

Для цитирования: Мозжухин Д.А., Нечаев В.Н., Субботин Р.А. Оптимизация захода на посадку в районе полетной информации Москвы: эколого-экономическая оценка внедрения процедуры непрерывного снижения // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 1. С. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-38-52

Optimization of the approach to Moscow Flight Information Region: Environmental and economic aspects of implementing the continuous descent procedure

D.A. Mozzhukhin¹, V.N. Nechaev², R.A. Subbotin²

¹Moscow Center for Automated Air Traffic Management, Moscow, Russia

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: With the growth of air traffic, the implementation of environmentally friendly and cost-effective technologies in civil aviation becomes increasingly important. One promising solution is the Continuous Descent Operations (CDO) mode, which ensures an optimal descent trajectory, reducing fuel consumption, CO₂ emissions, and noise near airports. This work develops an analytical model to evaluate the effectiveness of CDO implementation in the Moscow Flight Information Region, taking into account the optimization of air traffic control and airspace organization. The methodology includes mathematical modeling, expert evaluation, and simulation analysis. Algorithms are proposed for multifactor assessment of the impact of traffic density, air traffic control features, and weather conditions on CDO application. The results can be used to develop regulations and air traffic schemes in the Moscow area, contributing to fuel savings and environmental improvements in line with ICAO's 2016–2030 plan.

Key words: Continuous Descent Operations, efficiency assessment, air traffic control.

For citation: Mozzhukhin, D.A., Nechaev, V.N., Subbotin, R.A. (2026). Optimization of the approach to Moscow Flight Information Region: Environmental and economic aspects of implementing the continuous descent procedure. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-38-52

Введение

В условиях динамичного развития гражданской авиации актуальной задачей становится внедрение технологических решений, направленных на снижение экологического воздействия воздушного транспорта и повышение экономической эффективности полетов. Одним из перспективных направлений является процедура непрерывного снижения (Continuous Descent Operations, CDO), которая обеспечивает выполнение оптимизированного снижения с минимальным использованием тяги двигателей, что способствует сокращению расхода топлива и снижению уровня авиационного шума¹.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью реализации положений Глобального авионавигационного плана (ГАНП) на 2016–2030 годы, разработанного Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), в рамках которого процедура непрерывного снижения играет ключевую роль в модулях B1-RSEQ (оптимизация последовательности прибытия и вылета воздушных судов (ВС)) и B1-FRTO (оптимизация маршрутов полетов)².

На международной арене передовые узловые аэропорты, такие как Международный аэропорт Кансай (Япония) [1], а также аэропорты США (Луисвилль и Лос-Анджелес) [2, 3], успешно реализовали данную технологию, что привело к значительному сокращению эксплуатационных затрат и уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу. Внедрение аналогичных процедур в воздушном пространстве (ВП) Московской зоны представляется целесообразным и необходимым с точки зрения совершенствования системы

организации воздушного движения (ОрВД) и повышения эффективности авионавигационного обслуживания.

Ключевым преимуществом внедрения процедуры непрерывного снижения является его низкая капиталоемкость, поскольку современные гражданские ВС оснащены бортовыми системами управления полетом (FMS), способными автоматически рассчитывать оптимальные параметры снижения. Основные изменения касаются адаптации процедур диспетчерского управления, актуализации нормативной правовой базы и подготовки персонала служб обслуживания воздушного движения (ОВД). Международный опыт подтверждает, что реализация непрерывного снижения не требует масштабных инфраструктурных преобразований, однако обеспечивает значительные экологические и экономические преимущества³.

Целью данного исследования является разработка комплексной аналитической модели для оценки эффективности внедрения процедур непрерывного снижения в ВП Московского района полетной информации (РПИ). Разработка и внедрение таких моделей представляют актуальную научную и прикладную задачу, связанную с оптимизацией траекторий захода на посадку, минимизацией топливных затрат, сокращением выбросов углекислого газа и снижением уровня авиационного шума в районах, прилегающих к аэропортам.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования были определены следующие задачи:

- проведение анкетирования экспертной группы с целью оценки эффективности применения процедуры непрерывного снижения;

¹ Doc 9931-2010: Manual continuous descent operations (CDO). 1st ed. // ICAO, 2010. 60 p.

² Doc 9750: Глобальный авионавигационный план. 8-е изд. // ИКАО, 2016. 54 с.

³ Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Правила полетов. Приложение 2 к Конвенции о международной гражданской авиации. 10-е изд. // ИКАО, 2005. 104 с.

- применение математического моделирования для анализа процессов воздушного движения при внедрении CDO;
- разработка аналитической модели, позволяющей оценивать влияние непрерывного снижения на расход топлива и нагрузку на диспетчерские службы;
- создание алгоритмов и программного обеспечения для моделирования различных сценариев применения процедуры непрерывного снижения в Московской зоне.

Теоретическая значимость данного исследования заключается в разработке комплексного методологического подхода к оценке эффективности внедрения процедуры непрерывного снижения, основанного на интеграции экспертного анализа, имитационного моделирования на высокореалистичном пилотажном тренажере и разработке специализированного программного обеспечения для параметрической оптимизации траекторий снижения.

Таким образом, результаты исследования будут способствовать научно обоснованному внедрению процедур CDO в Московской зоне, что позволит повысить эффективность аэронавигационного обслуживания, снизить топливные затраты авиакомпаний и минимизировать экологическое и акустическое воздействие воздушного транспорта.

Методология исследования

Методологической основой исследования является комплексный подход, сочетающий теоретическое обоснование, математическое моделирование и экспертно-аналитические процедуры. Целью методологии является всесторонняя оценка применимости процедур непрерывного снижения в условиях высокой плотности воздушного движения Московского района полетной информации.

Основным методом исследования выступает математическое моделирование, направленное на количественную оценку эффективности внедрения процедуры непрерывного снижения с учетом аэродинамических, навигационных и эксплуатационных характеристик воздушных судов, а также специфики

организации воздушного движения в Московском авиационном узле.

Для обеспечения достоверности получаемых результатов была сформирована экспертная группа, включающая авиадиспетчеров первого класса с опытом работы более 10 лет. В рамках эмпирического этапа выполнено экспертное анкетирование, целью которого было выявление факторов, существенно влияющих на интегральный показатель применимости CDO, а также определение ключевых ограничений, связанных с действующей структурой воздушного пространства.

Симуляционное моделирование проводилось в два этапа.

1. Воздушная обстановка моделировалась с использованием специализированного симулятора, адаптированного к сценариям, типичным для Московской зоны.

2. Численное моделирование траекторных решений осуществлялось в среде MATLAB с использованием многопараметрической оптимизационной модели, учитывающей аэродинамические характеристики ВС типа Boeing 737-800.

Исходные параметры для численного моделирования:

крейсерский эшелон полета: FL360;

масса воздушного судна: 71 т;

температура воздуха на эшелоне: $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$;

ветровая ситуация: штиль;

профиль CDO: снижение с постоянным углом траектории 3° ;

расчет расхода топлива: по модели удельного расхода топлива (TSFC), зависящего от режима работы двигателя;

траекторные данные: сняты с FMS и тренажерных сценариев.

Система дифференциальных уравнений движения воздушного судна [4] в процессе снижения имеет следующий вид:

$$\frac{dh}{dt} = V \cdot \sin \gamma; \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{T-D}{m} - g \cdot \sin \gamma; \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = -TSFC \cdot T, \quad (3)$$

где h – высота полета;
 V – горизонтальная скорость;
 γ – угол наклона траектории;
 T – тяга двигателя (зависящая от высоты и скорости);
 D – аэродинамическое сопротивление;
 m – текущая масса ВС;
TSFC – удельный расход топлива (зависящий от режима работы);
 g – ускорение свободного падения.

Аэродинамическое сопротивление рассчитывалось по формуле [5]

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho(h) \cdot V^2 \cdot S, \quad (4)$$

где C_D – коэффициент лобового сопротивления (по данным Boeing);
 $\rho(h)$ – плотность воздуха по стандартной атмосфере ICAO;
 S – площадь крыла.

Оптимизационный критерий численного эксперимента был задан в виде функционала минимизации расхода топлива [6]:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} TSFC(t) \cdot T(t) dt. \quad (5)$$

Интегрирование уравнений производилось методом Рунге – Кутты четвертого порядка с шагом 0,1 с. Для учета влияния неопределенностей, таких как вариации массы и погодные условия, использовался метод Монте-Карло с количеством итераций $N = 1000$. В рамках моделирования оценивался как расход топлива, так и акустическая нагрузка на прилегающие к траектории районы.

Дополнительно разработан программный модуль на языке JavaScript, позволяющий имитировать сценарии траекторных конфликтов в условиях действующей структуры воздушного пространства Московского РПИ. Это позволило оценить потенциал интеграции CDO с точки зрения безопасности полетов и возможных конфликтов при ОВД при одновременном выполнении процедур снижения несколькими воздушными судами.

Результаты моделирования были подвергнуты экспертной оценке, согласованность

которой оценивалась с использованием коэффициента конкордации Кендалла. Полученное значение $W = 0,7$ указывает на высокую степень согласия мнений респондентов, что подтверждает надежность полученных выводов.

Таким образом, предложенная методология позволила комплексно оценить применимость процедуры непрерывного снижения в условиях реальной структуры воздушного пространства и высокой интенсивности полетов, характерной для Московского РПИ.

Результаты исследования

1. Оценка применимости CDO в Московском районе полетной информации

Для оценки применимости процедуры непрерывного снижения в Московском РПИ применялся метод экспертного анализа. Целью экспертного анализа являлось проведение ранжирования факторов по степени их воздействия на реализацию процедуры непрерывного снижения для выявления наиболее значимых параметров, оказывающих влияние на ее применение [7].

На основе анализа нормативных документов, особенностей организации воздушного движения, а также результатов экспертного анкетирования все факторы, влияющие на возможность реализации CDO, были классифицированы на три основные группы.

1. Факторы, снижающие общую пропускную способность воздушного пространства:

- неблагоприятные метеорологические явления (низкая облачность, грозовая деятельность, сильный ветер на эшелонах и в приземном слое);
- установленные временные и постоянные зоны ограничения, в том числе связанные с деятельностью органов Минобороны;
- высокая плотность входящего потока воздушных судов;
- необходимость применения процедур эшелонирования и маневрирования с отклонением от оптимальной траектории;

- близость расположения аэропортов между собой;
- разнообразие типов ВС в воздушном пространстве;
- возможное несовпадение направления CDO-профиля с установленными схемами захода.

2. Факторы, ограничивающие пропускную способность диспетчерских пунктов:

- сложность структуры воздушного пространства (множественность секторов и их конфигурации, наличие пересекающихся маршрутов);
- нормативно установленная пропускная способность сектора;
- высокая нагрузка на рабочие места диспетчеров в периоды интенсивного трафика;
- ограниченные возможности по предоставлению приоритетов различным категориям рейсов.

3. Организационно-технологические факторы:

- необходимость предварительного согласования применения CDO с органами ОВД;
- отсутствие унифицированных схем непрерывного снижения в пределах РПИ;
- недостаточный уровень автоматизации процессов управления воздушным движением (отсутствие автоматического прогнозирования траектории CDO);
- ограниченная совместимость процедуры непрерывного снижения с существующими алгоритмами формирования очередности на посадку.

Для количественной оценки и верификации экспертных мнений была проведена процедура оценки компетентности каждого эксперта. Компетентностная оценка осуществлялась на основе следующего выражения [8]:

$$K_{Э_i} = \frac{K_{a_i} + K_{и_i}}{K_{a_{max}} + K_{и_{max}}}, \quad (6)$$

где $K_{Э_i}$ – коэффициент, отражающий уровень компетентности i -го эксперта;

$K_{и_i}$ – коэффициент, отражающий уровень информированности i -го эксперта;

K_{a_i} – коэффициент, отражающий уровень аргументации i -го эксперта;

$K_{a_{max}}$ и $K_{и_{max}}$ – максимальные оценки коэффициентов K_{a_i} и $K_{и_i}$, обычно равные 1.

Агрегированное значение компетентности всей экспертной группы определялось по формуле

$$Q = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z K_{Э_i}. \quad (7)$$

На основе вычисленного уровня компетентности была сформирована итоговая выборка, использованная для экспертного опроса по определению показателя успешного применения процедуры CDO в Московском РПИ.

Для оценки степени согласованности экспертных суждений применялся коэффициент конкордации Кендалла [9, 10], определяемый следующим соотношением:

$$W = \frac{S}{S_{max}} = \frac{S}{\frac{1}{12} z^2 (m^3 - m) - z \sum_{j=1}^z T_j}, \quad (8)$$

где S – сумма квадратов отклонений суммарных средних вариантов рангов каждого варианта от суммарного среднего ранга вариантов;

S_{max} – максимально возможная сумма квадратов отклонений суммарных средних вариантов рангов каждого варианта от суммарного среднего ранга вариантов с учетом наличия связанных вариантов;

z – количество экспертов;

m – количество альтернативных вариантов, подлежащих ранжированию экспертами;

T_j – поправки, учитывающие связанные ранги.

В результате расчетов коэффициент конкордации составил 0,7, что свидетельствует о высокой степени согласованности экспертных оценок и позволяет сделать вывод о значительной вероятности успешного внедрения непрерывных снижений в ВП Московского РПИ.

Оценка реализации CDO определялась с использованием следующего выражения [11]:

Таблица 1
Table 1

Данные для расчета интегрального показателя, характеризующего применимость CDO
Data for calculation of integral index characterizing CDO applicability

Наиболее весомые факторы применимости CDO	Структура ВП	Интенсивность ВД	Метеоусловия	Оборудование
Весовые показатели	0,25	0,2	0,2	0,2
Оценки факторов	0,8	0,7	0,9	0,85

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{W_i \cdot \phi}{W_i}, \quad (9)$$

где W_i – весовые коэффициенты;
 ϕ – оценки факторов.

В табл. 1 представлены данные для расчета интегрального показателя применимости процедуры непрерывного снижения в Московском РПИ, определенные экспертной группой.

В процессе исследования каждому эксперту предлагалось оценить влияние конкретного фактора (например, «Структура ВП», «Метеоусловия» и т. п.) на возможность применения CDO по шкале от 0 до 1, где

- 1 – максимальное положительное влияние,
- 0 – отсутствие влияния.

Индивидуальные оценки экспертов усреднялись с учетом весов, зависящих от уровня их компетентности.

По результатам анализа экспертного опроса интегральный показатель, характеризующий возможность успешного внедрения процедуры CDO в Московском РПИ, составил 0,78, что свидетельствует о высокой степени реализуемости данной технологии в текущих эксплуатационных условиях.

2. Внедрение процедуры CDO в Московском РПИ

Процедура непрерывного снижения представляет собой разновидность траектории полета, реализуемой в фазе снижения воздушного судна и направленной на обеспечение более плавного, экологичного и эффективного подхода к аэродрому. Однако в условиях реального воздушного пространства

возможны множественные пересечения и конфликты траекторий, обусловленные существующими маршрутами прибытия и вылета. С учетом приоритетной задачи обеспечения безопасности полетов, при проектировании новых маршрутов с использованием CDO возникает потребность в разработке и применении специализированных инструментов, позволяющих выявлять потенциальные конфликты между новыми и действующими траекториями. Такие инструменты должны обеспечивать комплексный анализ пространственно-временных параметров полета, моделирование сценариев взаимодействия и формирование допустимых решений по предотвращению или разрешению выявленных конфликтных ситуаций.

В рамках анализа структуры воздушного пространства аэродромного узлового диспетчерского центра (АУЗДЦ) на этапе проектирования CDO-траекторий были выявлены пересечения траекторий, потенциально влияющие на безопасность. Поскольку создание траекторий осуществляется на основе известных путевых точек с применением методов интерполяции, в исследовании была разработана специальная программа на языке JavaScript, логика которой представлена на рис. 1.

В качестве точки отсчета для вычислений выбрана ВПП06 аэропорта Внуково, координаты которой заданы в виде широты и долготы. Для упрощения математических вычислений координаты были преобразованы из формата градусов, минут и секунд в десятичный вид.

Программа использует формулу Гаверсинуса для вычисления расстояния между двумя точками на поверхности земли, что позволяет учесть ее кривизну. Векторное произведение

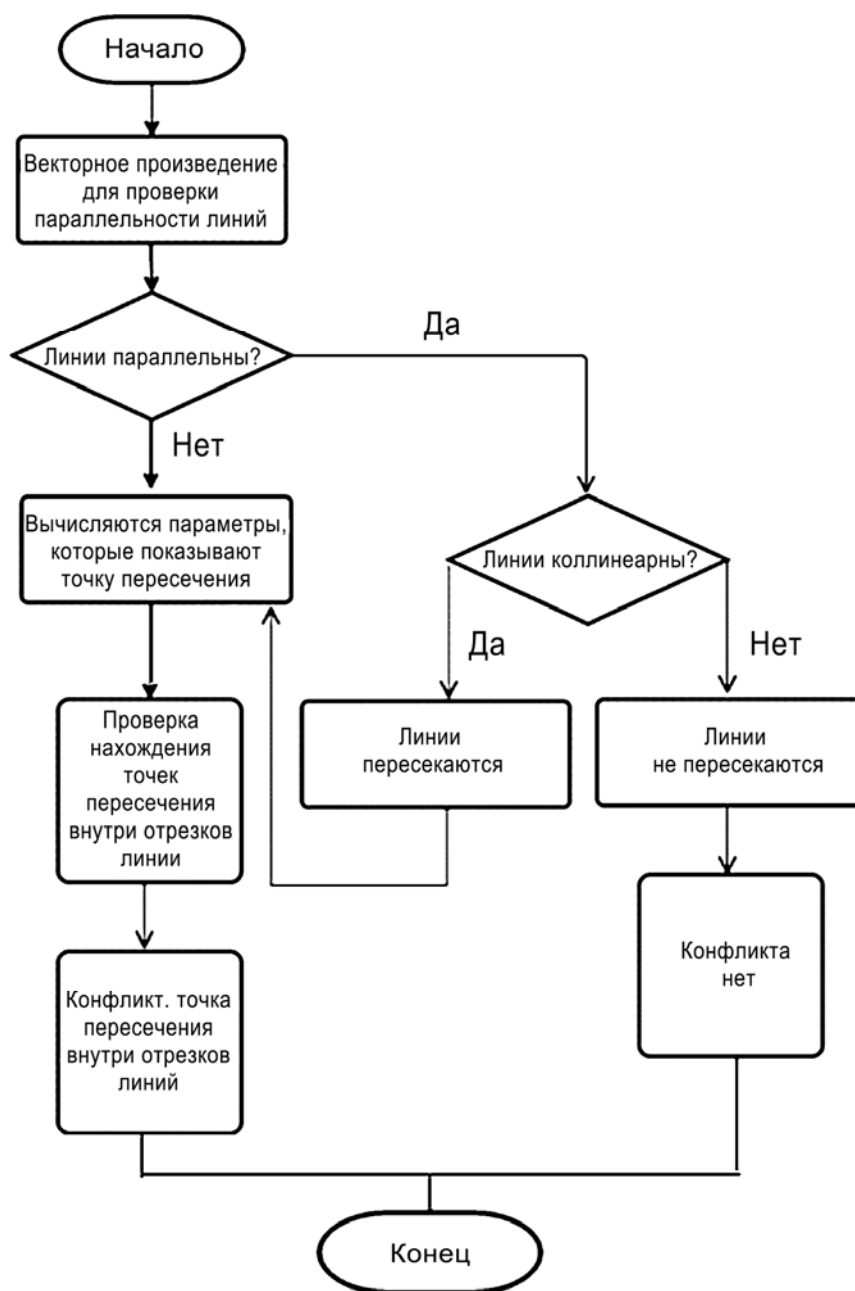


Рис. 1. Блок-схема определения точки пересечения воздушных трасс
Fig. 1. Flowchart for determining the intersection point of aircraft routes

используется для проверки параллельности двух линий, заданных парами точек (p_1, p_2 и q_1, q_2), что является важным этапом при анализе потенциальных конфликтов между траекториями. В случае параллельных линий выполняется дополнительная проверка на коллинеарность, чтобы определить, лежат ли линии на одной прямой. Если линии коллинеарны, они либо совпадают, либо не пересекаются.

Если линии непараллельны, программа вычисляет параметры t и u , которые показы-

вают точку их пересечения. Далее алгоритм проверяет, находятся ли эти точки пересечения внутри отрезков линий. В случае если точка пересечения лежит вне отрезков, программа сообщает об отсутствии конфликта.

Для повышения точности вычислений алгоритм анализирует разницу между координатами точек пересечения с использованием порогового значения (в данном случае 10 единиц). Если разница между координатами меньше заданного порога, программа воз-

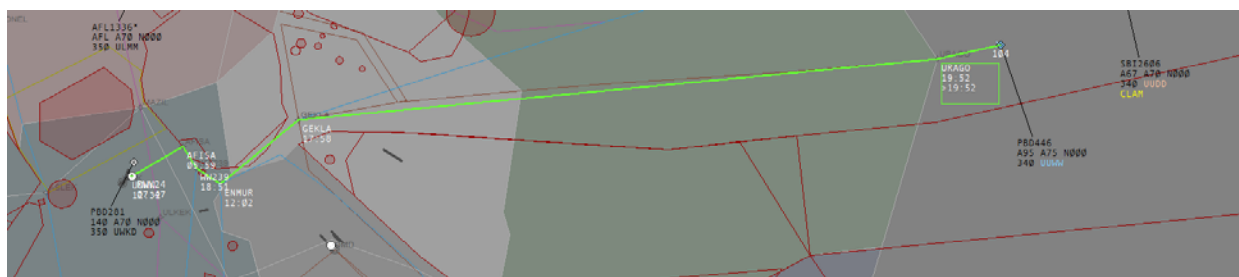


Рис. 2. Схема с применением процедуры непрерывного снижения URAGO 1C
Fig. 2. STAR using CDO URAGO 1C

вращает точку пересечения, учитывая погрешности вычислений. Этот подход позволяет эффективно моделировать и анализировать взаимодействие различных маршрутов прибытия, что важно для оптимизации воздушного движения и предотвращения конфликтных ситуаций в аэродромной зоне. Таким образом разработанный алгоритм дает возможность гибко изменять маршрут прибытия с CDO, избегая возникновения конфликтных пересечений траекторий ВС.

На рис. 2 в качестве схемы с CDO для захода во Внуково с востока будет использоваться схема URAGO 1C, которая состоит из навигационных точек (данные взяты из AIP):

URAGO (553300.00N, 0395953.00E);
GEKLA (553330.00N, 0395923.00E);
ENMUR (553310.00N, 0373419.00E);
WW239 (553531.10N, 0373010.50E);
AFISA (553817.80N, 0372814.00E);
WW451 (553659.54N, 0372221.97E).

Наибольшее внимание в этой схеме прибытия уделялось зоне ограничений использования воздушного пространства (ИВП) UUR215 (аэродром Раменское), который работает на высотах от FL150 до FL980 [12]. Однако стоит отметить, что данное ограничение вводится только в период активного использования воздушного пространства аэродромом Раменское.

Существует три сценария пролета зоны ограничения UUR215 при применении процедуры непрерывного снижения по схеме URAGO 1C.

1. В случае если в графике полетов не предусмотрено использование этой части

воздушного пространства, она становится доступной для маневрирования. Тогда схема прибытия URAGO 1C будет состоять из навигационных точек URAGO-ENMUR-WW239-AFISA-WW451, а траектория полета будет содержать минимальное количество поворотных пунктов.

2. При наличии ограничений на использование воздушного пространства диспетчеры Московского центра ОВД могут напрямую связаться с диспетчерами аэродрома Раменское, согласовав пролет зоны ограничения отдельных ВС даже при действующих ограничениях на ИВП.

3. Если ИВП в зоне UUR215 ограничено, а пролет зоны по согласованию запрещен, маршрут с использованием процедуры CDO будет выполняться по полной схеме прибытия с CDO и состоять из навигационных точек URAGO-GEKLA-ENMUR-WW239-AFISA-WW451.

Таким образом, гибкость в организации маршрутов с учетом ограничений ВП и возможностей согласования с аэродромами позволяет эффективно использовать технологии CDO, минимизируя риски.

На рис. 3 представлены традиционные схемы прибытия во Внуково DIMGI 3A и DIMGI 3B.

Навигационные маршруты в новой структуре ВП проектировались по принципу бесконфликтности трасс [13]. Навигационная точка DIMGI предназначена для направления воздушных судов на посадку в Шереметьево и Внуково, а через точку URAGO следуют воздушные суда, совершающие посадку в Домодедово. Отличие традиционных схем прибы-



Рис. 3. Схемы прибытия DIMGI 3А и DIMGI 3В
Fig. 3. STARs DIMGI 3A and DIMGI 3B

тия от схемы прибытия с непрерывным снижением состоит в переносе точки начала снижения с DIMGI на URAGO для ВС, следующих в аэропорт Внуково. Перенос точки ToD с DIMGI на URAGO позволит разгрузить диспетчера за счет перераспределения потоков ВС. По официальным данным Федерального агентства воздушного транспорта, по итогам 2024 года самым загруженным аэропортом России является Шереметьево (Москва) – он обслужил примерно 43,7 млн пассажиров. Перенаправив часть потока ВС, следующих на посадку, во Внуково через точку URAGO, можно достичь более равномерного и безопасного потока воздушных судов.

Вследствие переноса точки начала снижения над URAGO могут возникнуть пересечения траекторий ВС, прибывающих по схемам с CDO и вылетающих из Внуково и Шереметьево. Благодаря разработанному программному обеспечению после моделирования измененной структуры ВП в зоне АУЗДЦ были обнаружены пресечения траекторий ВС. В связи с этим необходимо реорганизовать часть вылета из Внуково (выполнить вылет на запад с целью предотвращения конфликта с прилетным потоком, облететь запретные зоны UUP52 и UUP53, далее выполнить правый доворот по направлению запланированного полета на навигационную точку KOGOM). Чтобы реорганизованный вылет из Внуково не конфликтовал с вылетом из Шереметьево, ВС необходимо осуществить аналогичный маневр сначала на запад, параллельно маршруту вы-

лета из Внуково, далее правым разворотом на точки DUFAR – TIRDE – KOGOM. Над точкой KOGOM уже установлены ограничения по высоте (констрейны) для ВС, вылетающих с разных аэродромов, поэтому конфликтные пересечения траекторий там будут отсутствовать. Реорганизованные маршруты вылета схематично представлены на рис. 4.

Разработка и внедрение процедуры непрерывного снижения (CDO) в воздушном пространстве Московского РПИ направлены не только на оптимизацию потоков воздушного движения и повышение безопасности, но и на достижение ощутимых эксплуатационных и экологических выгод. Особенно заметен положительный эффект от применения CDO в районе аэродрома Внуково, где снижение тяги двигателей при снижении и сокращение участков горизонтального полета способствуют уменьшению расхода топлива и снижению уровня шума вблизи аэропорта. Рассмотрим подробнее ключевые преимущества, которые обеспечивает внедрение данной процедуры в условиях интенсивного воздушного движения Московского района полетной информации.

3. Преимущества от внедрения процедуры непрерывного снижения в Московском РПИ

Процедуры непрерывного снижения находят широкое применение благодаря ряду значительных преимуществ. Их реализация

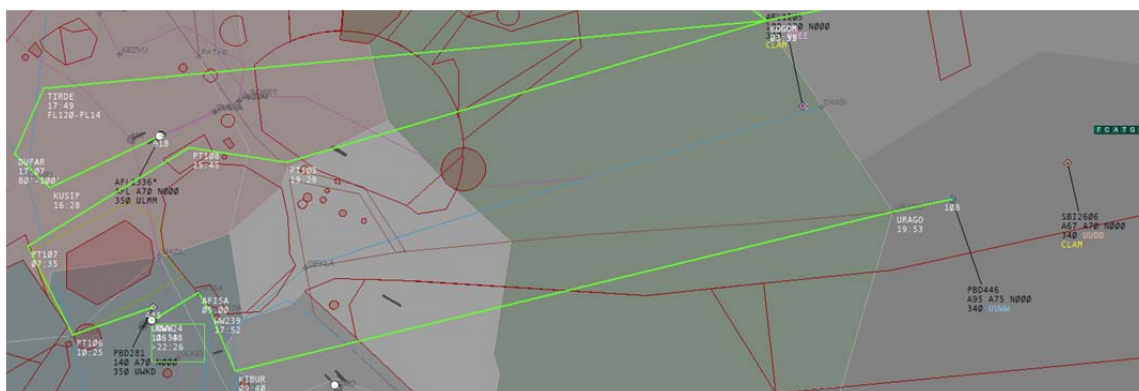


Рис. 4. Изменение в маршрутах вылета из Внуково и Шереметьево
Fig. 4. Change in departure routes from Vnukovo and Sheremetyevo

позволяет не только повысить эффективность полетов, но и снизить негативное воздействие авиации на окружающую среду. К основным достоинствам CDO относятся:

1. **экономия топлива** – снижение потребления топлива на этапе снижения по сравнению с традиционным ступенчатым профилем;

2. **сокращение выбросов вредных веществ** – уменьшение количества выбросов CO₂, NO_x и других загрязняющих веществ в атмосферу;

3. **снижение уровня шума** – сокращение акустического воздействия за счет более плавного и предсказуемого профиля снижения.

Каждое из этих преимуществ важно как с точки зрения эксплуатации воздушных судов, так и с позиции устойчивого развития авиационной отрасли. Ниже приведено более подробное объяснение каждого из них.

Для оценки эффективности процедуры непрерывного снижения в Московском РПИ введем понятие расхода топлива. В системе управления полетом (FMS) расход топлива при снижении ВС рассчитывается на основе нескольких параметров, включая аэродинамическое сопротивление, режим работы двигателя, массу ВС, профиль снижения и метеоусловия.

Основные формулы, используемые для расчета расхода топлива [14]:

$$m_{fuel} = TSFC \cdot T, \quad (10)$$

где m_{fuel} – мгновенный расход топлива;

$TSFC$ – удельный расход топлива;
 T – тяга двигателя.

Во время снижения двигатели работают на пониженном режиме, поэтому T существенно уменьшается, что снижает расход топлива [15].

$$T \approx D, \\ D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S, \quad (11)$$

где D – аэродинамическое сопротивление;
 C_D – коэффициент лобового сопротивления;
 ρ – плотность воздуха;
 V – скорость полета;
 S – площадь крыла.

Для оценки расхода топлива при снижении с учетом данных о скорости и высоте в FMS используется следующая зависимость:

$$m_{fuel,desc} = \frac{TSFC \cdot C_D \rho V^2 S (h_{init} - h_{final})}{2V_{vert}}. \quad (12)$$

После реорганизации части структуры ВП и разработки схемы с применением непрерывного снижения URAGO 1С было проведено моделирование на симуляторе full flight. Топливная эффективность схемы с использованием процедуры непрерывного снижения и традиционной схемы рассчитана с помощью выражения (12) и представлена в табл. 2.

Таким образом, сокращение расхода топлива при непрерывном снижении составило 780 кг, что эквивалентно приблизительно 75 %

Таблица 2
Table 2

Параметры ВС при снижении по схеме URAGO 1C (с CDO) и по схеме DIMGI 3B
Aircraft parameters during descent under URAGO 1C (with CDO) and DIMGI 3B arrivals

STAR	DIMGI 3B	URAGO 1C (с CDO)
Остаток топлива на борту на момент начала снижения	6 440 кг	6 260 кг
Остаток топлива на борту после снижения	5 400 кг	6 000 кг
Условия по ветру	штиль	штиль
Температура за бортом на FL300	-43 °C	-43 °C
Вес самолета	71 т	71 т
Тип ВС	B737	B737
Расход топлива	1 040 кг	260 кг

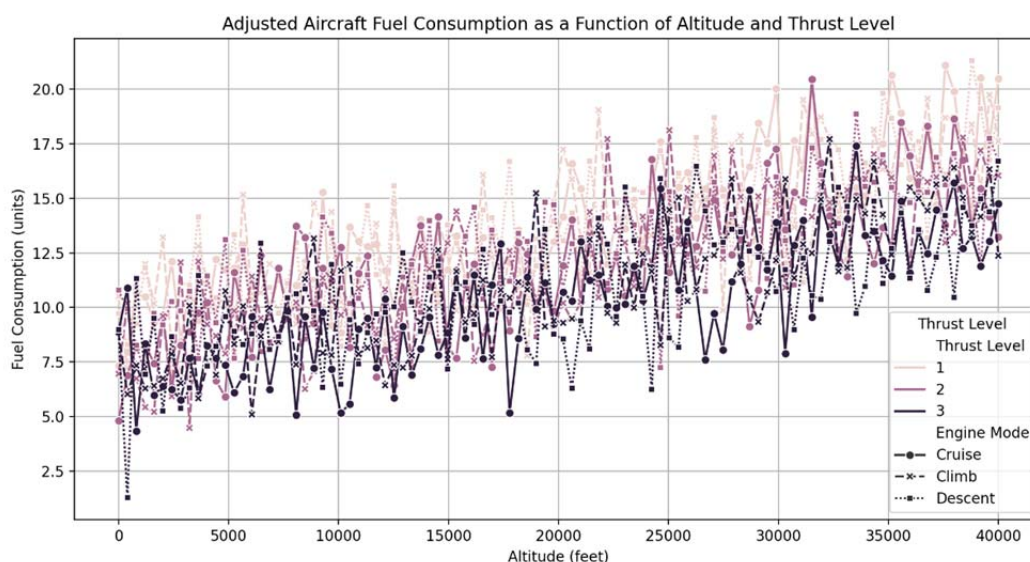


Рис. 5. График зависимости расхода топлива ВС от режима работы двигателя и высоты полета
Fig. 5. Graph of dependence of aircraft fuel consumption on engine operation mode and flight altitude

по сравнению с традиционным снижением, что в среднем дает экономию порядка 25 % от общего расхода топлива на всем маршруте. На рис. 5 показана зависимость расхода топлива от режима работы двигателя и высоты полета.

Полученная разница в расходе топлива при традиционном снижении и снижении с CDO позволяет рассчитать финансовую выгоду от применения непрерывного снижения. На российском рынке цена авиационного топлива JET A-1 варьируется в зависимости от региона, объема закупки и условий по-

ставки. Например, оптовая стоимость на авиационное топливо JET A-1 составляет примерно 56 000–62 000 рублей за тонну (или около 56–62 рублей за килограмм), по данным крупных поставщиков, таких как «Газпромнефть-Аэро». Однако точные цены могут зависеть от условий договора и региона поставки. Таким образом, финансовая выгода от изменения одной схемы прибытия с постоянным снижением составит около 46 020 рублей за один полет.

В дополнение к значительной экономии топлива реализация процедуры непрерывного

Таблица 3
Table 3

Сравнение уровней шума (SEL) при различных сценариях снижения
Comparison of Sound Exposure Levels (SEL) under Different Descent Scenarios

Сценарий	SEL, дБ(А), на 6 км	Разница
Традиционное снижение DIMGI 3В	81,4	
Снижение по CDO URAGO 1С	77,6	-3,8

снижения позволяет существенно сократить акустическое воздействие на местность, что особенно актуально для Московской зоны ответственности. Снижение тяги двигателей и устранение горизонтальных участков полета ведет к уменьшению общего уровня шума при заходе на посадку. Для оценки акустических эффектов от внедрения процедуры непрерывного снижения в Московском РПИ использовалась модель расчета уровня звукового воздействия на местность с применением программного комплекса INM v7.0 (Integrated Noise Model). Данный программный продукт является признанным мировым стандартом для акустического моделирования в гражданской авиации и официально рекомендован ИКАО для расчетов воздействия авиационного шума.

Входные данные для расчета включали:

- профили траекторий: полученные в результате численного моделирования в MATLAB и с использованием Full Flight Simulator (для профилей DIMGI 3В и CDO URAGO 1С);
- тип ВС: Boeing 737-800 с двигателями CFM56-7В;
- массу ВС при заходе: 67–71 т (учитывалась переменная масса при моделировании Монте-Карло);
- метеоусловия: стандартная атмосфера ICAO, скорость ветра у земли < 5 узлов;
- режим работы двигателей: согласно FMS и профилям CDO, с учетом сниженной тяги на этапе снижения.

В качестве акустического показателя был выбран SEL (Sound Exposure Level), дБ(А) – суммарный уровень звуковой экспозиции, учитывающий как громкость шума, так и его продолжительность (рекомендуется ИКАО

как основной интегральный показатель для анализа шума на местности при пролете ВС).

Контрольная точка:

- расстояние: 6 км от торца ВПП аэропорта Внуково (по оси ВПП);
- высота точки измерения: на уровне земной поверхности (1,5 м над уровнем земли).

В INM v7.0 для каждого сценария (традиционное снижение DIMGI 3В и CDO URAGO 1С) были рассчитаны траектории и акустическое воздействие по методике Single Event SEL, что позволяет оценить эффект от пролета одного ВС на данной точке (табл. 3).

Таким образом, снижение уровня авиационного шума на местность при переходе к CDO составило 3,8 дБ(А) по показателю SEL в контрольной точке.

Кроме того, профили непрерывного снижения демонстрируют более равномерное и плавное снижение акустического воздействия на всем участке захода на посадку за счет уменьшения числа участков работы двигателей на повышенных режимах (промежуточные горизонтальные участки при традиционном снижении), увеличения высоты пролета над населенными пунктами, сокращения длительности звукового события (меньшая продолжительность горизонтальных этапов).

Заключение

В рамках проведенного исследования была дана комплексная оценка применимости процедуры непрерывного снижения (CDO) в воздушном пространстве Московского РПИ, а также рассмотрены особенности ее интеграции в существующую структуру маршрутов и диспетчерского обеспечения.

Анализ нормативных документов, особенностей организации воздушного движения и экспертного анкетирования позволил выявить ключевые факторы, влияющие на реализацию CDO в высоконагруженной зоне воздушного пространства. Эти факторы были классифицированы на три основные группы: влияющие на пропускную способность воздушного пространства, на загруженность диспетчерских пунктов, а также организационно-технологические. С целью обоснованного ранжирования этих факторов была реализована методика экспертной оценки с учетом компетентности участников, а согласованность суждений подтверждена высоким значением коэффициента конкордации Кендалла ($W = 0,7$).

В результате количественного анализа получено значение интегрального показателя реализуемости CDO в Московском РПИ, равное 0,78. Это свидетельствует о высокой степени готовности региона к внедрению процедуры непрерывного снижения в текущих условиях эксплуатации при наличии определенных технологических и организационных адаптаций.

Для повышения эффективности проектирования CDO-траекторий в работе была разработана программная реализация алгоритма на языке JavaScript, позволяющая оперативно выявлять потенциальные точки пересечения траекторий с учетом пространственно-временных параметров полета. Это решение направлено на минимизацию вероятности конфликтов и формирование безопасных и оптимальных траекторий прибытия.

Особое внимание уделено проектированию схемы URAGO 1C с использованием CDO при заходе на посадку в аэропорт Внуково с восточного направления. Были рассмотрены различные сценарии обхода зоны ограничения UUR215, что подтвердило возможность гибкого применения CDO с учетом динамики использования воздушного пространства и взаимодействия с другими органами ОВД.

Таким образом, представленное исследование демонстрирует не только теоретическую обоснованность применимости CDO в условиях сложного и насыщенного воздушного движения Московского РПИ, но и пред-

лагает конкретные решения по интеграции данной технологии в существующую систему воздушного движения. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке рекомендаций для внедрения CDO в России, а также для совершенствования нормативно-методической базы, обеспечивающей безопасную и эффективную эксплуатацию воздушного пространства.

Список литературы

1. **Toratani D.** Design methodology to simulate continuous descent operations at Kansai International Airport / D. Toratani, N.K. Wickramasinghe, S. Fukushima, H. Hirabayashi // 2017 Winter Simulation Conference (WSC). USA: Las Vegas, 2017. Pp. 2578–2588. DOI: 10.1109/WSC.2017.8247985
2. **Clarke J.-P., Brown J.A., Elmer K.R. и др.** Continuous descent approach: design and flight test for Louisville international airport // Journal of Aircraft. 2004. Vol. 41, no. 5. Pp. 1054–1066. DOI: 10.2514/1.5572
3. **Clarke J.-P.** Optimized profile descent arrivals at Los Angeles international airport / J.-P. Clarke, J. Brooks, G. Neagle, A. Scacchioli, W. White, S. Liu // Journal of Aircraft. 2013. Vol. 50, no. 2. Pp. 360–369. DOI: 10.2514/1.C031529
4. **Stevens B.L., Lewis F.L.** Aircraft control and simulation. 3rd ed. New Jersey: Wiley, 2015. 768 p.
5. **Anderson J.D.** Fundamentals of aerodynamics. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 1152 p.
6. **Bryson A.E.** Applied optimal control: Optimization, estimation, and control. New York: Taylor & Francis, 1975. 500 p.
7. **Нищук Е.П., Резниченко С.В.** Сущность и анализ метода экспертных оценок и основные подходы к его использованию // Проблемы идентификации, качества и конкурентоспособности потребительских товаров: материалы V Международной конференции в области товароведения и экспертизы товаров. Курск, 10 ноября 2017 г. Курск: Университетская книга, 2017. С. 206–210.

8. Лясковский В.Л., Саркисян Д.А. Метод формирования экспертных групп для оценки предложений по проведению ФППИ // Компетентность. 2020. № 3. С. 4–9. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10301

9. Постников В.М., Черненко В.М. Методы принятия решений в системах организационного управления: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 208 с.

10. Кабанов В.А., Комарова Е.С. Использование метода конкордации в оценке согласованности экспертных мнений // Реакция региональной экономики на внешние вызовы: материалы межвузовской научно-практической конференции, Владимир, 18 ноября 2016 г. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. С. 39–42.

11. Подиновский В.В., Потапов М.А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: Pro et contra // Бизнес-информатика. 2013. № 3 (25). С. 41–43.

12. Мозжухин Д.А. Особенности организации воздушного пространства в районе аэроузлового диспетчерского центра // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2023: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации. Иркутск, 7–8 декабря 2023 г. Иркутск: МГТУ ГА, 2024. С. 168–179.

13. Дивак Н.И. К вопросу о разработке новой структуры воздушного пространства московской воздушной зоны // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 67–71.

14. Колодяжный Д.Ю. Методика численного моделирования процесса распада жидкой пленки в пневматической форсунке авиадвигателя / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов, В.Я. Модорский // Известия вузов. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 93–97.

Богомолов Д.В., Харченко М.Э. Обоснование норм расхода авиационного топлива методами математической статистики // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: тезисы

докладов международной научно-технической конференции, Москва, 16–17 мая 2018 г. Москва: Академия им. Н.Э. Жуковского, 2018. С. 20.

References

1. Toratani, D., Wickramasinghe, N.K., Fukushima, S., Hirabayashi, H. (2017). Design methodology to simulate continuous descent operations at Kansai International Airport. In: 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, USA, pp. 2578–2588. DOI: 10.1109/WSC.2017.8247985

2. Clarke, J.-P., Brown, J.A., Elmer, K.R. et al. (2004). Continuous descent approach: design and flight test for Louisville international airport. *Journal of Aircraft*, vol. 41, no. 5, pp. 1054–1066. DOI: 10.2514/1.5572

3. Clarke, J.-P., Brooks, J., Neagle, G., Scacchioli, A., White, W., Liu, S. (2013). Optimized profile descent arrivals at Los Angeles international airport. *Journal of Aircraft*, vol. 50, no. 2, pp. 360–369. DOI: 10.2514/1.C031529

4. Stevens, B.L., Lewis, F.L. (2015). Aircraft control and simulation. 3rd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 768 p.

5. Anderson, J.D. (2016). Fundamentals of aerodynamics. 6th ed. New York, McGraw-Hill Education, 1152 p.

6. Bryson, A.E. (1975). Applied optimal control: Optimization, estimation, and control. New York, Taylor & Francis, 500 p.

7. Nischuk, E.P., Reznichenko, S.V. (2017). The essence and analysis of the expert evaluation method and main approaches to its application. In: *Problemy identifikatsii, kachestva i konkurentosposobnosti potrebitelskikh tovarov: materialy V mezhdunarodnoy konferentsii v oblasti provedeniya i ekspertizy tovarov*. Kursk: Universitetskaya kniga, pp. 206–210. (in Russian)

8. Lyaskovskiy, V.L., Sarkisyan, D.A. (2020). Expert groups formation method to evaluate proposals for FPPI. *Competency (Russia)*, no. 3, pp. 4–9. (in Russian)

9. Postnikov, V.M., Chernenkiy, V.M. (2014). *Decision-making methods in organiza-*

tional management systems: Tutorial. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 208 p. (in Russian)

10. Kabanov, V.A., Komarova, E.S. (2016). Using the concordance method in assessing the consistency of expert opinions. *In: Reaktsiya regionalnoy ekonomiki na vneshniye vyzovy: materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Vladimir: Vladimirovskiy filial RANKhiGS, pp. 39–42. (in Russian)

11. Podinovsky, V.V., Potapov, M.A. (2013). Weighted-sum method of criteria in the analysis of multicriteria decisions: Pro et contra. *Biznes-informatika*, no. 3 (25), pp. 41–43. (in Russian)

12. Mozhukhin, D.A. (2024). Specific features of airspace organization in the area of an air hub control center for an air hub. *In: Aktualnyye problemy razvitiya aviatsionnoy tekhniki i metodov yeyo ekspluatatsii – 2023: materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov, posvyashchen-*

noy prazdnovaniyu 100-letiya otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii. Irkutsk: MGTU GA, pp. 168–179. (in Russian)

13. Divak, N.I. (2014). On the development of a new structure of Moscow area airspace. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 209, pp. 67–71. (in Russian)

14. Kolodyazhny, D.Yu., Nagorny, V.S., Sipatov, A.M., Modorsky, V.Ya. (2017). A technique for numerical modeling of the liquid film disintegration in the pneumatic injector of aircraft engines. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, no. 1, pp. 93–97. (in Russian)

15. Bogomolov, D.V., Kharchenko, M.E. (2018). Justification of aviation fuel consumption rates using mathematical statistics methods. *In: Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii.* Moscow: Akademiya im. N.Ye. Zhukovskogo, p. 20. (in Russian)

Сведения об авторах

Мозжухин Денис Алексеевич, магистр, диспетчер Московского центра автоматизированного управления воздушным движением, аспирант МГТУ ГА, mozhukhin1998@mail.ru.

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, v.nechaev@mstuca.ru.

Субботин Роман Александрович, кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, r.subbotin@mstuca.ru.

Information about the authors

Denis A. Mozhukhin, Master of Science, Air Traffic Controller at the Moscow Center for Automated Air Traffic Management (MC AATM), Postgraduate Student at Moscow State Technical University of Civil Aviation, mozhukhin1998@mail.ru.

Vladimir N. Nechaev, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, the Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.nechaev@mstuca.ru.

Roman A. Subbotin, Associate Professor, Candidate of Military Sciences, Associate Professor of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, r.subbotin@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	22.04.2025	Received	22.04.2025
Одобрена после рецензирования	22.09.2025	Approved after reviewing	22.09.2025
Принята в печать	22.01.2026	Accepted for publication	22.01.2026