

Системы наблюдения и организации воздушного движения/ Air Traffic Monitoring  
and Management Systems

Научная статья

УДК 378.162.33

<https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-28>

**МЕТОД РАСЧЕТА ИНДЕКСА СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ  
ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА СЕКТОРОВ РДЦ НА ОСНОВЕ ПКС  
(MTCD)**

*Анатолий Анатольевич Торосян\*,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации им. Главного  
маршала авиации А.А. Новикова,  
Санкт-Петербург, Россия*

*Николай Евгеньевич Баранов,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации им. Главного  
маршала авиации А.А. Новикова,  
Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Предложен метод расчета секторного индекса структурной сложности воздушной обстановки в секторах районного диспетчерского центра (РДЦ) на основе потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС), формируемых средствами прогнозного обнаружения конфликтов (MTCD). Метод использует минимальный набор атрибутов ПКС (тип, прогнозные времена начала/окончания, секторная принадлежность участников), агрегирует события в скользящем прогножном окне  $\Delta T=20$  минут и учитывает различную значимость геометрий взаимодействия и длительность присутствия ПКС внутри окна. Итоговый индекс определяется как взвешенное среднее нормированных плановой и вертикальной компонент с насыщением в шкале 0–10. Экспериментальная апробация выполнена по данным ПКС для четырех секторов РДЦ Регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург), приведены сводные показатели и временные профили  $C_s(t)$ .

**Ключевые слова:** сложность воздушной обстановки; РДЦ; сектор ОВД; ПКС; MTCD; прогноз конфликтов; индекс сложности; вес геометрии.

**Для цитирования:**

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. – <https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-28>

**Вклад авторов в работу:**

А. А. Торосян – разработка концепции исследования, дизайна статьи, написание текста рукописи, сбор и систематизация данных, ответственность за все аспекты работы и целостность всех частей.

Н. Е. Баранов – постановка задачи и выбор общего подхода к решению, утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

\* Ответственный автор за связь с редакцией

**Original research article**

**METHOD FOR CALCULATING THE SECTOR STRUCTURAL  
COMPLEXITY INDEX OF AIRSPACE IN AREA CONTROL SECTORS  
BASED ON POTENTIAL CONFLICT SITUATIONS (MTCD)**

*Anatoly A. Torosyan\**,  
*Saint Petersburg State University of Civil Aviation  
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,  
St. Petersburg, Russia*

*Nikolay E. Baranov,*  
*Saint Petersburg State University of Civil Aviation  
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,  
St. Petersburg, Russia*

**FEDERAL STATE-FUNDED EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION  
"SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF CIVIL AVIATION NAMED IN HONOR  
OF AIR CHIEF MARSHAL A.A. NOVIKOV**

**Abstract.** The method is proposed for calculating a sector index of structural complexity of the air situation in area control center (ACC) sectors based on potential conflict situations generated by predictive conflict detection (MTCD) tools. The method uses a minimum set of MTCD attributes (type, predicted start/end times, sector affiliation of participants), aggregates events over a sliding forecast window of  $\Delta T=20$  minutes, and takes into account the varying significance of interaction geometries and the duration of the PCS presence within the window. The resulting index is determined as a weighted average of normalized horizontal and vertical components with saturation on a 0–10 scale. Experimental testing was performed using MTCD data for three ACC sectors of the Unified Air Traffic Management Center (St. Petersburg); summary indicators and time profiles  $C_s(t)$  are presented.

**Keywords:** air situation complexity; ACC; ATC sector; PCS; MTCD; conflict prediction; complexity index; geometry weight.

**To cite this article:**

Torosyan, A. A., Baranov, N. E. (2026). Method for calculating the sector structural complexity index of airspace in area control sectors based on potential conflict situations (MTCD). Crede Experto: transport, society, education, language, vol. 13, no. 2, pp. 28-42 DOI: <https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-28> (in Russ.).

**Author Contributions:**

Anatoly A. Torosyan: research concept, article design, text writing, data collection and systematization, responsibility for all aspects of the work and the integrity of all parts.

Nikolay E. Baranov: formulation of the problem and selection of the general approach to its solution, approval of the final version of the text for publication.

**Conflict of Interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Введение (Introduction)**

Современные системы организации воздушного движения ориентированы на повышение пропускной способности при сохранении требуемого уровня

---

\* Corresponding author

безопасности. На уровне районного диспетчерского центра (РДЦ) это приводит к необходимости регулярной оценки сложности воздушной обстановки по секторам, в том числе для мониторинга нагрузки, сравнительного анализа периодов работы и обоснования организационно-технических решений. Использование только показателей интенсивности воздушного движения (например, числа воздушных судов (ВС)) недостаточно, поскольку практическая сложность управления в значительной степени определяется конфигурацией потенциальных конфликтных взаимодействий, неоднородностью потоков и ограничениями по манёвру, а связь «сложность-загруженность» носит опосредованный характер и зависит от процедур, оснащённости и стратегий диспетчера [Мацкевич, 2022; Determining Air..., 2020].

В работе предлагается метод расчета индексной оценки структурной сложности сектора РДЦ  $C_s(t)$ , основанный на агрегировании ПКС в фиксированном прогнозом окне  $\Delta T=20$  мин. В отличие от простого подсчета событий, метод учитывает значимость геометрии взаимодействия и длительность присутствия ПКС внутри окна, что согласуется с тенденцией перехода от «счётчиков плотности» к структурно-ориентированным показателям сложности [Lee et al., 2009].

### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В качестве исходной эмпирической базы для анализа показателей ПКС использовались данные, полученные с применением программного средства «Исследование ОрВД» (в составе комплекса имитационного моделирования) [Комплекс..., 2006; Комплекс..., 2021; Попов и др., 2012, с. 61; Попов и др., 2015; Роров, 2013]. Исходный поток воздушного движения и параметры структуры воздушного пространства рассматриваемых секторов РДЦ задавались в среде моделирования, после чего выполнялось имитационное воспроизведение движения ВС по сформированным 4D-траекториям. В ходе моделирования автоматически фиксировались ПКС как ситуации, потенциально приводящие к нарушению установленных норм эшелонирования при отсутствии вмешательства диспетчера.

### **Дискуссия (Discussion)**

С появлением инструментов прогнозного обнаружения конфликтов (Medium-Term Conflict Detection, MTCDD) [Лосев и др., 2015; Computational..., 2009; EUROCONTROL..., 2017; Prandini et al., 2012; Wang et al., 2018] становится доступным набор событийных данных о потенциальных конфликтных ситуациях (ПКС), включающий типизацию конфликтов и их прогнозные интервалы существования. В современных исследованиях по оценке сложности усиливается роль формализованных метрик, учитывающих структуру взаимодействий и сетевые/геометрические характеристики воздушного движения, а также методов

машинного обучения для аппроксимации «оценки сложности» по наблюдаемым параметрам ситуации [Determining Air..., 2020; Wang et al., 2018; АТСЕМ..., 2016; Кулида и др., 2023; Нгуен и др., 2024].

Расчёт ПКС осуществлялся между всеми рейсами, входящими в исследуемый суточный поток ВС за 31.08.2019. Механизм обнаружения основан на контроле пересечения объёмов безопасности вокруг каждого ВС: для каждого ВС формируется цилиндрический объём с радиусом  $R$  (норма горизонтального эшелонирования) и высотой  $2H$  (норма вертикального эшелонирования). Значения  $R$  и  $H$  задавались в настройках исследовательского средства перед запуском сценария. ПКС регистрировалась в случае проникновения объёма безопасности одного ВС в объём безопасности другого (включая кратковременные пересечения), при этом результаты моделирования сохранялись и далее систематизировались по типу ПКС (C1–C9) (рисунок 1), месту возникновения (участки трасс/элементы ВП) и времени (момент начала и окончания) для последующей статистической обработки и расчёта интегральных показателей сложности.

Следует отметить, что в работе расчёт индекса выполнялся по данным ПКС, автоматически формируемым в комплексе имитационного моделирования (КИМ) ОрВД [Комплекс..., 2021] на реальном суточном потоке ВС и далее агрегируемым в скользящем окне расчёта, поэтому отдельные графические изображения ПКС не могут быть поставлены в однозначное соответствие с итоговыми значениями компонент и интегрального индекса структурной сложности.








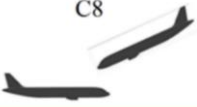

	На одном эшелоне	Один изменяет эшелон	Оба изменяют эшелоны
Пересечение	C1 	C2 	C3 
Догон	C4 	C5 	C6 
Встречный курс	C7 	C8 	C9 

Рисунок 1 – Типы ПКС [Комплекс..., 2006]

Figure 1 – Types of potential conflict situations [Degtyarev et al., 2006]

Для каждой ПКС  $i$  используется следующий набор атрибутов:

$$z_i = (c_i, t_i^{start}, t_i^{end}, s_i^1, s_i^2), \quad (1)$$

где  $c_i \in \{C1, \dots, C9\}$  – тип ПКС;  $t_i^{start}$  и  $t_i^{end}$  – прогнозные времена начала и окончания ПКС;  $s_i^1$  и  $s_i^2$  – секторы РДЦ, соответствующие 1-му и 2-му участнику конфликтной пары (т.е. ВС).

Расчет индекса проводится в скользящем окне  $[t, t+\Delta T)$ , где  $\Delta T=20$  минут, учитывается длительность присутствия ПКС в окне, что позволяет отразить «занятость» прогнозного горизонта конфликтными взаимодействиями.

### Метод расчета индекса структурной сложности

Таблица 1 представляет классификацию ПКС в соответствии с рисунком 1, используемую в исследовании для последующего расчёта и анализа показателей сложности воздушной обстановки. Классификация основана на декомпозиции ПКС по двум признакам: геометрии взаимодействия воздушных судов  $G(c)$  и вертикальному фактору  $m(c)$ , отражающему наличие/отсутствие изменения эшелона (вертикального манёвра) участниками ситуации. По признаку  $G(c)$  выделяются три базовых типа: *пересечение траекторий* – *cross*, *догон* – *overtake* и *встречные курсы* – *opposite*. Признак  $m(c)$  принимает дискретные значения 0, 1, 2:  $m(c)=0$  соответствует движению обоих ВС на постоянной высоте;  $m(c) = 1$  – вертикальная скорость имеется у одного ВС;  $m(c)=2$  – вертикальные скорости присутствуют у обоих ВС. Комбинация указанных признаков однозначно задаёт тип ПКС С1–С9, что обеспечивает формализованное кодирование конфликтных взаимодействий и сопоставимость результатов при обработке данных имитационного моделирования.

Таблица 1 – Классификация ПКС по геометрии и вертикальному фактору  
 Table 1 – Classification of potential conflict situations by geometry and vertical factor

Тип ПКС	Геометрия $G(c)$	Вертикальность $m(c)$	Интерпретация $m(c)$
С1	Пересечение	0	оба на постоянной высоте
С2	Пересечение	1	одно ВС с вертикальной скоростью
С3	Пересечение	2	оба ВС с вертикальными скоростями
С4	Догон	0	оба на постоянной высоте
С5	Догон	1	одно ВС с вертикальной скоростью
С6	Догон	2	оба ВС с вертикальными скоростями
С7	Встречные курсы	0	оба на постоянной высоте

Тип ПКС	Геометрия $G(c)$	Вертикальность $m(c)$	Интерпретация $m(c)$
С8	Встречные курсы	1	одно ВС с вертикальной скоростью
С9	Встречные курсы	2	оба ВС с вертикальными скоростями

Каждой ПКС сопоставляются класс геометрии взаимодействия  $G(c)$  и показатель вертикальности  $m(c)$ :

$$G(c) \in \{cross, overtake, opposite\}, m(c) \in \{0, 1, 2\}, \quad (2)$$

где  $G(c)$  – класс геометрии (пересечение, догон, встречные курсы);  $m(c)$  – число ВС в конфликтной паре, выполняющих вертикальный маневр (набор или снижение): 0 – отсутствует, 1 – одно ВС, 2 – оба ВС.

Для учета неодинаковой «операторной тяжести» геометрий вводится вес  $g(G)$ . Весовой коэффициент  $g(G)$ , применяемый для расчетов определялся на основе экспертной процедуры. Для этого была сформирована группа из 30 диспетчеров РДЦ, которым предъявлялся набор имитационных сценариев, отличающихся исключительно геометрией конфликтной ситуации при неизменности остальных условий, а именно:

- одинаковое число воздушных судов (2–3);
- фиксированная типовая конфигурация скоростей и эшелонов;
- одинаковые параметры временного окна и горизонта прогнозирования;
- отсутствие ограничений, связанных со структурой и правилами работы сектора РДЦ.

Задачей экспертов было дать субъективную оценку операторной тяжести каждой ситуации по девятибалльной шкале (где 1 – минимальная нагрузка и 9 – максимальная). Полученные оценки использовались в качестве обоснования значения  $g(G)$ . Далее рассчитывалась средняя оценка эксперта по классу геометрии для эксперта. После усреднения по сценарию и по группе экспертов веса формируются в относительной шкале (с базированием встречного движения):

$$g_{opposite} = 1, g_{overtake} = \frac{\mu_{overtake}}{\mu_{opposite}}, g_{cross} = \frac{\mu_{opposite}}{\mu_{cross}}, \quad (3)$$

где  $\mu_{cross}, \mu_{overtake}, \mu_{opposite}$  – средние экспертные оценки операторной тяжести для геометрий (пересечение, догон, встречные) соответственно. В ходе экспериментальной апробации были получены значения:

$$g(\textit{opposite}) = 1.00, g(\textit{overtake}) = 0.54, g(\textit{cross}) = 0.76. \quad (4)$$

### Секторная привязка и множество событий в окне

ПКС относится к сектору  $s$ , если хотя бы одно из двух воздушных судов в записи ПКС принадлежит сектору  $s$ . Вводится индикатор учета ПКС:

$$\chi_s(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } s = s_i^{(1)} \text{ или } s = s_i^{(2)} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Множество ПКС, учитываемых в секторе  $s$  в окне  $[t, t + \Delta T)$ , определяется пересечением интервалов существования ПКС с окном:

$$K_s(t) = \{i : \chi_{s(i)} = 1 \wedge [t_i^{start}, t_i^{end}) \cap [t, t + \Delta T) \neq \emptyset\}. \quad (6)$$

### Вес по длительности присутствия ПКС

Для различения кратковременных и длительных конфликтных взаимодействий вводится длительность пересечения ПКС  $i$  с окном:

$$D_i(t) = \left| [t_i^{start}, t_i^{end}) \cap [t, t + \Delta T) \right| \quad (7)$$

и нормированный вес длительности:

$$\omega_D(D_i(t)) = \min \left( 1, \max \left( \frac{D_i(t)}{\Delta T} \right) \right), \quad (8)$$

где  $w_D \in [0, 1]$  интерпретируется как доля окна  $\Delta T$ , в течение которой ПКС  $i$  присутствует в прогнозе.

### Агрегаты компонент и итоговый индекс

Ненормированные агрегаты компонент структурной сложности определяются как:

$$S_{cross,s}(t) = \sum_{i \in K_s(t)} g(G(c_i)) \cdot w_D(D_i(t)) \quad (9)$$

и

$$S_{vert,s}(t) = \sum_{i \in K_s(t)} g(G(c_i)) \cdot \frac{m(c_i)}{2} \cdot w_D(D_i(t)), \quad (10)$$

где  $S_{cross,s}(t)$  – плановая (горизонтальная) компонента;  $S_{vert,s}(t)$  – вертикальная компонента. Деление  $m(c_i)/2$  нормирует вертикальную вовлеченность пары к диапазону  $\{0, 0.5, 1\}$  как долю от максимума (два участника).

Для обеспечения сопоставимости компонент сложности внутри сектора и исключения зависимости от абсолютного масштаба агрегатов  $S_{cross,s}(t)$  и  $S_{vert,s}(t)$  выполняется их нормирование в безразмерную шкалу  $[0;1]$ . В качестве референсных значений используются максимальные наблюдаемые значения соответствующих агрегатов по всему множеству окон расчёта  $\tau$  для сектора  $s$ . Нормированные компоненты определяются выражениями:

$$\tilde{S}_{cross,s}(t) = \max\left(0, \min\left(\frac{S_{cross,s}(t)}{S_{cross,s}^{норм}}(t), 1\right)\right), \quad \tilde{S}_{vert,s}(t) = \max\left(0, \min\left(\frac{S_{vert,s}(t)}{S_{vert,s}^{норм}}(t), 1\right)\right), \quad (11)$$

где  $\tilde{S}_{cross,s}(t)$  – нормированная горизонтальная составляющая сложности сектора  $s$ ,  $\tilde{S}_{vert,s}(t)$  – нормированная вертикальная составляющая сложности сектора  $s$ ,  $S_{cross,s}^{норм}(t)$  и  $S_{vert,s}^{норм}(t)$  – референсные значения (масштабирующие множители), задаваемые как максимумы:

$$S_{cross,s}^{норм}(t) = \max_{t \in \mathcal{T}} S_{cross,s}(t), \quad S_{vert,s}^{норм}(t) = \max_{t \in \mathcal{T}} S_{vert,s}(t). \quad (12)$$

Выбор референса как максимума обеспечивает однозначную интерпретацию шкалы, наиболее сложное из наблюдаемых состояний сектора соответствует уровню 1, а остальные значения отражают долю от этого уровня. Итоговый индекс структурной сложности сектора рассчитан как взвешенное среднее нормированных компонент с переводом в шкалу  $0 \dots 10$  и насыщением:

$$C_s(t) = 10 \cdot \min\left(1, \frac{\beta \cdot \tilde{S}_{cross,s}(t) + \gamma \cdot \tilde{S}_{vert,s}(t)}{\beta + \gamma}\right), \quad (13)$$

где  $C_s(t)$  – индекс структурной сложности воздушной обстановки сектора РДЦ,  $\beta$  и  $\gamma$  – веса относительной значимости плановой и вертикальной компонент (в расчетах использованы  $\beta = 1.76$ ,  $\gamma = 1.25$ ) [Торосян и др., 2026].

### Результаты (Results)

Экспериментальная апробация выполнена по данным ПКС (MTCD) для секторов РДЦ района полётной информации (РПИ) Санкт-Петербург: «Запад», «Север», «Юго-Запад», «Юго-Восток», присутствующих в выгрузке ПКС имитационного. Расчет производился в скользящем окне  $\Delta T=20$  минут с дискретностью 1 мин по времени  $t$ . Для каждого сектора  $s$  формировались агрегаты  $S_{cross,s}(t)$  и  $S_{vert,s}(t)$  согласно формулам (9) и (10) с учетом весов геометрии (3-4) и веса длительности (8). Референсные значения для нормирования выбирались как максимумы агрегатов на всем интервале наблюдения для каждого сектора, что обеспечивает согласование шкалы  $[0,1]$  и сопоставимость динамики внутри сектора при минимуме дополнительных предположений.

В таблице 2 приведены сводные показатели по секторам: число записей ПКС ( $\Delta T = 20$  мин), референсные значения  $S_{ref}$ , максимальное значение индекса  $C_{max}$ , момент достижения максимума  $t_{C_{max}}$ . Временные профили  $C_s(t)$  для рассматриваемых секторов представлены на рисунке 2.

Таблица 2 – Сводные показатели индекса сложности по секторам УЛЛЛ  
 Table 2 – Summary indicators of the complexity index by ULLL sectors

Сектор	Кол-во ПКС	$S_{cross,s}^{norm}(t)$	$S_{vert,s}^{norm}(t)$	$C_{max}$	$t_{C_{max}}$
Запад	8	0.5400	0.12037	6.7597	31.08.2019 01:21
Север	2	0.4149	0.20745	10.0000	31.08.2019 13:12
Юго-Восток	9	0.4968	0.24840	10.0000	31.08.2019 11:06
Юго-Запад	5	0.5553	0.00000	5.8472	31.08.2019 15:24

Полученные результаты иллюстрируют, что индекс корректно отражает эпизодический характер конфликтной нагрузки, длительные интервалы со слабой конфликтностью сменяются относительно короткими периодами резкого роста сложности.

В рассматриваемой выборке для секторов «Север» и «Юго-Восток» наблюдается достижение насыщения  $C_{max} = 10$ , что соответствует окнам с максимальными для сектора значениями нормированных компонент и свидетельствует о концентрированном появлении ПКС в прогнозе. В секторе «Запад» максимум ограничивается уровнем порядка 6–7, что можно

интерпретировать как наличие конфликтных взаимодействий умеренной плотности без устойчивого выхода на наиболее напряженный режим. Для секторов «Петрозаводск» и «Юго-Запад» вертикальная компонента в выборке отсутствует ( $S_{vert,s}^{norm} = 0$ ), и индекс формируется преимущественно плановой составляющей.

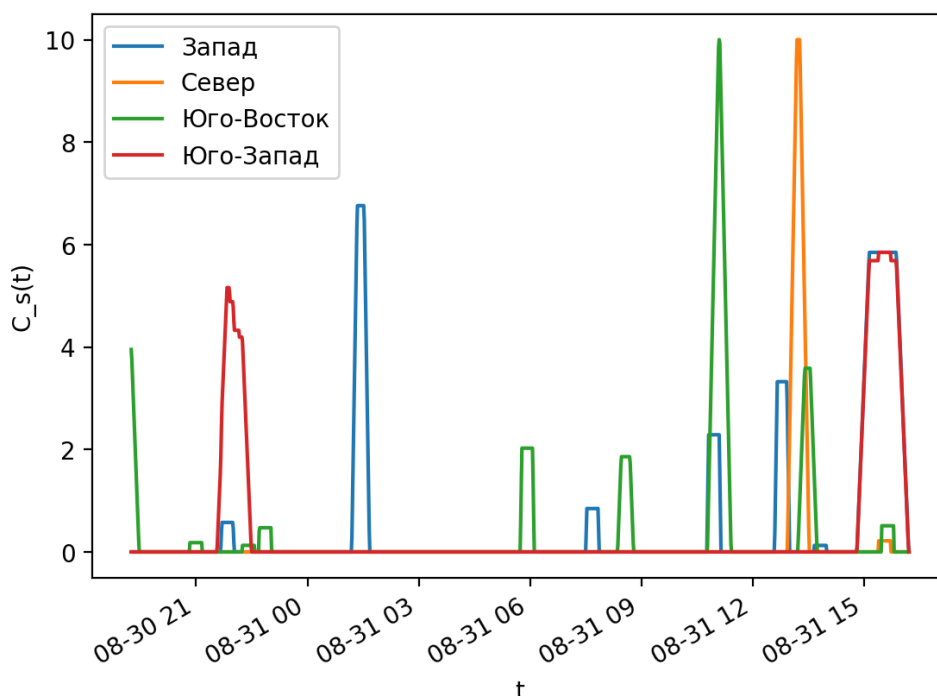


Рисунок 2 – Индекс сложности рассматриваемых секторов ( $\Delta T=20$  мин.)  
Figure 2 – Difficulty index of the sectors under consideration ( $\Delta T=20$  min.)

Использование веса длительности  $w_D$  повышает информативность индекса по сравнению с простым счетом ПКС в окне. При одинаковом числе событий разные значения  $w_D$  приводят к различию вкладов: длительное присутствие ПКС в пределах 20-минутного прогноза создает большую «занятость» окна конфликтными связями и, соответственно, повышает индекс. Что особенно важно для прикладных задач – например, при сравнении режимов работы сектора в разные периоды или при ранжировании секторов по уровню конфликтной нагрузки.

### Обсуждение

Предложенная конструкция индекса ориентирована на применение при минимальном наборе исходных полей МТСД. Секторная привязка по условию «хотя бы одно ВС в секторе» является консервативной, она обеспечивает учет событий на границах.

Разложение на плановую и вертикальную компоненты  $S_{cross,s}(t)$  и  $S_{vert,s}(t)$  обеспечивает более содержательное описание «профиля сложности» по сравнению

с единой суммой. Плановая компонента отражает насыщение сектора конфликтными взаимодействиями в горизонтальной плоскости (пересечения, догон, встречные), тогда как вертикальная компонента характеризует наличие манёвров набора/снижения в конфликтной паре, что обычно повышает неопределённость траекторного прогноза и усложняет мониторинг.

Учёт веса геометрии ( $g(\textit{opposite}) = 1.00$ ,  $g(\textit{overtake}) = 0.54$ ,  $g(\textit{cross}) = 0.76$ ) демонстрирует чувствительность индекса к предположениям о «операторной тяжести» различных конфигураций. В частности, при усилении относительной значимости встречных курсов вклад таких ПКС становится доминирующим, что закономерно смещает пики  $C_s(t)$  в те интервалы, где обнаруживаются конфликты с геометрией «встречные». Это свойство следует рассматривать не как недостаток, а как управляемую настройку индекса, изменяя  $g(G)$ , можно адаптировать метрику к особенностям конкретного района ОВД, процедурам и типичному распределению потоков.

Вес длительности  $w_D(D_i(t))$  вводит в оценку важную временную составляющую: кратковременные пересечения объёмов безопасности вносят меньший вклад, чем устойчивые (длительные) ПКС, занимающие значительную долю 20-минутного окна прогнозирования. Это приближает агрегат к понятию «нагрузки мониторинга» – диспетчер в течение времени (20 мин.) вынужден удерживать в поле внимания конфликтную связь, а не только реагировать на факт её возникновения.

Нормирование компонент по максимуму в секторе ( $S_{\dots,s}^{\text{норм}}(t) = \max S_{\dots,s}(t)$ ) обеспечивает ясную интерпретацию шкалы, значение 1 соответствует наиболее сложному из наблюдаемых состояний сектора на рассматриваемом интервале, а остальные значения трактуются как доля от этого «пикового» состояния. Это обеспечивает удобство для анализа динамики внутри одного сектора и сопоставления периодов в пределах одной выборки.

В то же время такой выбор референса потенциально чувствителен к единичным экстремальным ситуациям. В представленном алгоритме влияние редких выбросов частично ограничено: вклад каждой ПКС ограничен  $w_D \in [0,1]$ , итоговый индекс содержит насыщение  $\min(1, \cdot)$ , расчёт выполняется в фиксированном окне  $\Delta T=20$  минут.

Предложенная методика согласуется с общим назначением МТСД как функции предупреждения диспетчера о вероятном нарушении интервалов эшелонирования на горизонте до десятков минут, реализуемой в составе средств траекторного прогнозирования и мониторинга. Формализация индекса  $C_s(t)$  использует именно те сущности, которые характерны для требований к МТСД: прогнозный горизонт, оценка вероятной потери эшелонирования, влияние

геометрии и траектории, а также необходимость представления информации диспетчеру в агрегированном, интерпретируемом виде. В этом смысле индекс может рассматриваться как надстройка для аналитической оценки динамики сложности и сопоставления секторов на основе событий, выявляемых МТСД.

### **Заключение (Conclusion)**

В статье предложен метод расчёта индекса структурной сложности воздушной обстановки в секторах РДЦ на основе потенциальных конфликтных ситуаций, формируемых средствами МТСД. Метод опирается на минимальный набор доступных полей (тип ПКС, времена начала/окончания, секторная принадлежность воздушных судов) и использует прогнозное окно фиксированной длины  $\Delta T=20$  мин.

Основные результаты и выводы:

1. Построена формализация секторного индекса  $C_s(t)$  в шкале 0–10 как взвешенного среднего нормированных плановой и вертикальной компонент с насыщением по верхней границе.

2. Введён вес по длительности  $w_D(D_i(t))$ , учитывающий долю прогнозного окна, занятую ПКС; это позволяет отличать кратковременные и устойчивые конфликтные взаимодействия без привлечения дополнительных параметров детекции.

3. Показано, что применение весов геометрии  $g(G)$  делает индекс чувствительным к характеру конфликтов и позволяет адаптировать метрику к особенностям района ОВД. В экспериментальной апробации выполнен расчёт с весами ( $g(\text{opposite}) = 1.00$ ,  $g(\text{overtake}) = 0.54$ ,  $g(\text{cross}) = 0.76$ ), получены секторные профили  $C_s(t)$ .

Практическая значимость работы состоит в возможности оперативно рассчитывать индексы сложности по секторам на основе стандартных выгрузок МТСД и использовать их для анализа динамики нагрузки, сравнения секторов и выявления интервалов максимальной напряжённости, что создаёт основу для последующей оптимизации секторизации и поддержки решений по управлению динамической пропускной способностью.

### **Список литературы**

Кулида Е. Л. Методы решения задач планирования и регулирования потоков воздушного движения. Ч. 1. Стратегическое планирование четырехмерных траекторий / Е. Л. Кулида, В. Г. Лебедев // Проблемы управления. 2023. №1. С. 3-14. DOI 10.25728/ru.2023.1.1. EDN IPSSWG.

Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения / Л. В. Вишнякова, А. С. Попов, В. Ю. Сикачев, [и др.] // Журнал «Полет». 2021. №7. С. 22-37. EDN MBACSZ.

Комплекс имитационного моделирования УВД / О. В. Дегтярев, В. П. Егорова, И. Ф. Зубкова [и др.] // *Авиационные системы в XXI веке: Юбилейная научно-техническая конференция, сборник трудов*, Москва, 11–13 апреля 2006 года. Том 2. М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2006. С. 261–268. EDN VTRYBH.

*Лосев С. Н.* Вероятностно-геометрический метод среднесрочного обнаружения конфликтов между воздушными судами / С. Н. Лосев, В. И. Макаренко, Н. Н. Подольская // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Т. 16. №4. С. 277–282. DOI 10.17587/mau.16.277-282. EDN TQNKXN.

*Мацкевич А. М.* Модели и алгоритмы поддержки принятия решений и их использование в тренажерной подготовке специалистов управления воздушным движением // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2022. Т. 25. №5. С. 25–36. DOI 10.26467/2079-0619-2022-25-5-25-36. EDN WZZQUJ.

*Нгуен Т. Л. Ф.* Разработка методики идентификации и разрешения конфликтных ситуаций при оперативном планировании четырехмерной траектории полета / Т. Л. Ф. Нгуен, Е. С. Неретин, Н. М. Нгуен // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2024. №2. С. 77–95. DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_2\_77. EDN SCSVDZ.

*Попов А. С.* Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) / А. С. Попов, Л. В. Вишнякова, О. В. Дегтярев // *Всерос. науч.- практич. конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС)*. Труды конференции. М.: 2012. С. 59–67.

*Попов А. С.* Имитационное моделирование системы организации воздушного движения / А. С. Попов, Л. В. Вишнякова, В. Ю. Сикачев // *Седьмая всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД2015)*, Труды конференций, Т.1 Пленарные доклады. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 23–24.

*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 Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации*. 2026. №1. С. 58–67. EDN RCEGLV.

Determining Air Traffic Complexity – Challenges and Future Development / B. Antulov-Fantulin, B. Juricic, T. Radisic, C. Çetek // *Promet – Traffic & Transportation*. 2020. Vol. 32, №4. Pp. 475–485. DOI 10.7307/ptt.v32i4.3401. EDN KROOWM.

Computational red teaming to investigate failure patterns in Medium Term Conflict Detection / S. Alam, H. A. Abbass, C. J. Lokan, M. Ellejmi, S. Kirby // *8th Innovative Research Workshop and Exhibition, Proceedings (Bre'tigny-sur-Orge, France)* // [Электронный ресурс]. – 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228918671\\_Computational\\_Red\\_Teaming\\_to\\_Investigate\\_Failure\\_Patterns\\_in\\_Medium\\_Term\\_Conflict\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/228918671_Computational_Red_Teaming_to_Investigate_Failure_Patterns_in_Medium_Term_Conflict_Detection) (дата обращения: 20.01.2026).

EUROCONTROL Specification for Medium-Term Conflict Detection (MTCD) : SPEC-0139, Edition 2.0 (PDF) [Электронный ресурс]. – 2017. URL: [https://www.eurocontrol.int/archive\\_download/all/node/10494](https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/10494) (дата обращения: 03.02.2026).

*Lee K.* Describing Airspace Complexity: Airspace Response to Disturbances / K. Lee, E. Feron, A. Pritchett // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2009. №32(1). Pp. 210–222. DOI 10.2514/1.36308.

*Popov A. S.* The Russian Federation Airspace Structure Analysis with the Use of ATM Research Simulation Tool // *Proceedings of the 4:th Council of European Aerospace Societies (CEAS) Air and Space Conference*. Linkoping. 2013. Pp. 569–578.

*Prandini M.* Air Traffic Complexity in Future Air Traffic Management Systems / M. Prandini, V. Putta, J. Hu // *Journal of Aerospace Operations*. 2012. Vol. 1, No. 3. Pp. 281-299. DOI 10.3233/AOP-2012-0015.

*Wang H.* Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach / H. Wang, Z. Song, R. Wen // *Journal of Advanced Transportation*. 2018. Pp. 1-15. DOI 10.1155/2018/5254289.

ATCEM: A Synthetic Model for Evaluating Air Traffic Complexity / M. Xiao, J. Zhang, K. Cai, X. Cao // *Journal of Advanced Transportation*. 2016. Vol. 50, №3. Pp. 315-325. DOI 10.1002/atr.1321.

## References

*Alam S., Abbass H. A., Lokan C. J., Ellejmi M., Kirby S.* (2009). Computational red teaming to investigate failure patterns in Medium Term Conflict Detection. *8th Innovative Research Workshop and Exhibition, Proceedings (Brétigny-sur-Orge, France, December 2009)*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228918671\\_Computational\\_Red\\_Teaming\\_to\\_Investigate\\_Failure\\_Patterns\\_in\\_Medium\\_Term\\_Conflict\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/228918671_Computational_Red_Teaming_to_Investigate_Failure_Patterns_in_Medium_Term_Conflict_Detection) (accessed 20.01.2026).

*Antulov-Fantulin B., Juricic B., Radisic T., Cetek C.* (2020). Determining Air Traffic Complexity – Challenges and Future Development. *Promet-Traffic&Transportation*. 32(4): pp.475-485. DOI 10.7307/ptt.v32i4.3401.

*Degtyarev O. V., Egorova V. P., et al.* (2006). Air Traffic Control Simulation Complex. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference “Aviation Systems in the 21st Century”*. 2. Moscow: GosNIIAS. (2). (In Russian)

EUROCONTROL Specification for Medium-Term Conflict Detection (MTCD): SPEC-0139, Edition 2.0. (2017). Available at: [https://www.eurocontrol.int/archive\\_download/all/node/10494](https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/10494) (accessed: 03.02.2026). (In English)

*Kulida E. L., Lebedev V. G.* (2023). Methods for Solving Problems of Air Traffic Flow Planning and Regulation. *Part 1: Strategic Planning of Four-Dimensional Trajectories. Control Sciences*. (1): pp. 3-14. DOI 10.25728/pu.2023.1.1. (In Russian)

*Lee K., Feron E., Pritchett A.* (2009). Describing Airspace Complexity: Airspace Response to Disturbances. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 32(1): pp.210-222. DOI 10.2514/1.36308.

*Losev S. N., Makarenko V. I., Podolskaya N. N.* (2015). A Probabilistic-Geometric Method for Medium-Term Conflict Detection Between Aircraft. *Mechatronics, Automation, Control*. 16(4): 277-282. DOI 10.17587/mau.16. Pp.277-282. (In Russian)

*Matskevich A. M.* (2022). Decision Support Models and Algorithms and Their Use in Simulator Training of Air Traffic Control Specialists. *Civil Aviation High Technologies*. 25(5): pp.25-36. DOI 10.26467/2079-0619-2022-25-5-25-36. (In Russian)

*Nguyen T. L. Ph., Neretin E. S., Nguyen N. M.* (2024). Development of a Method for Identifying and Resolving Conflict Situations in Operational Planning of a Four-Dimensional Flight Trajectory. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. (2): pp.77–95. DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_2\_77. (In Russian)

*Popov A. S.* (2013). The Russian Federation Airspace Structure Analysis with the Use of ATM Research Simulation Tool. *Proceedings of the 4th Council of European Aerospace Societies (CEAS) Air and Space Conference. Linköping*. Pp.569-578.

*Popov A. S., Vishnyakova L. V., Degtyarev O. V.* (2012). Air Traffic Management Simulation Complex (KIM ATM). All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modelling of Socio-Economic Systems (VKIMSES), Proceedings. Moscow. Pp.59-67. (In Russian)

- Popov A. S., Vishnyakova L. V., Sikachev V. Yu. (2015). Simulation Modelling of the Air Traffic Management System. *Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation Modelling. Theory and Practice" (IMMOD2015), Proceedings*. Moscow: IPU RAN. 1: pp.23-24. (In Russian)
- Prandini M., Putta V., Hu J. (2012). Air Traffic Complexity in Future Air Traffic Management Systems. *Journal of Aerospace Operations*. 1(3): 281-299. DOI: 10.3233/AOP-2012-0015.
- Torosyan A. A., Shevchenko T. V., Tarasov D. O. (2026). Algorithmic Principles of Air Traffic Control Sectors Dynamic Capacity Calculating Based on Hybrid Fuzzy Logic. *Bulletin of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation*. 1: pp.58-67. (In Russian)
- Vishnyakova L. V., Popov A. S., Sikachev V. Yu., et al. (2021). Air Traffic Management System Simulation Complex. *Polet (All-Russian Scientific and Technical Journal)*. (7): pp.22-37. (In Russian)
- Wang H., Song Z., Wen R. (2018). Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach. *Journal of Advanced Transportation*. 2018: 1-15. DOI 10.1155/2018/5254289.
- Xiao M., Zhang J., Cai K., Cao X. (2016). ATCEM: A Synthetic Model for Evaluating Air Traffic Complexity. *Journal of Advanced Transportation*. 50(3): pp.315–325. DOI 10.1002/atr.1321.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Анатольевич Торосян – старший преподаватель кафедры управления воздушным движением, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, ул. Пилотов, 38, Санкт-Петербург, 196210, Россия; orcid.org/0009-0002-0481-8195; e-mail: mr.toros1@mail.ru

Николай Евгеньевич Баранов – кандидат технических наук, доцент, декан факультета лётной эксплуатации, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, ул. Пилотов, 38, Санкт-Петербург, 196210, Россия; orcid.org/0000-0003-1426-6486; e-mail: mr.toros1@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly A. Torosyan, Senior Lecturer, Department of Air Traffic Control, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, 38 Pilotov St., St. Petersburg, 196210, Russia; orcid.org/0009-0002-0481-8195; e-mail: mr.toros1@mail.ru

Nikolay E. Baranov, Cand. of Sci. (Technology), Associate Professor, Dean of the Faculty of Flight Operations, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, 38 Pilotov St., St. Petersburg, 196210, Russia; orcid.org/0000-0003-1426-6486; e-mail: mr.toros1@mail.ru

Поступила в редакцию  
Принята в печать  
Опубликована

20.02.2026  
23.03.2026  
16.06.2026

Received  
Accepted for publication  
Published

February 20, 2026  
March 23, 2026  
16 June 2026