

УДК 656.7.08.614.8

DOI 10.26118/1598.2025.35.90.035

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Мещанов Вадим Алексеевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Панюков Александр Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

Методика краткосрочной оценки риска потери эшелонирования с учетом геометрии конфликта и качества наблюдений в системах STCA

Аннотация. Представлена методика краткосрочной оценки риска потери эшелонирования воздушных судов для систем краткосрочного предупреждения конфликтов (STCA – Short-Term Conflict Alert). Вводится интегральный индекс риска в диапазоне 0-100, рассчитываемый на горизонте прогноза 60-120 с. с частотой обновления 1-5 Гц. Индекс формируется на основе нормированных показателей времени до наибольшего сближения (TCPA – Time to Closest Point of Approach), прогнозируемой минимальной горизонтальной дистанции (DCPA – Distance at Closest Point of Approach), вертикального запаса относительно норм эшелонирования, а также скалярного показателя неопределенности прогноза по ковариациям трек-фильтра. Описаны правила нормировки показателей риска (TCPA, DCPA, вертикальный запас, показатель неопределенности) и их агрегирования в единый индекс с интерпретацией по уровням оперативного внимания STCA (предупреждение/действие). Приведен алгоритмический протокол применения методики, включающий верификацию на архивных треках с формированием эталонных распределений индекса и адаптацию порогов под конкретный сектор (маршрутный или терминальный). Обсуждены ограничения, связанные с качеством наблюдений и линейностью краткосрочного прогноза. Методика предназначена для унификации настроек STCA, снижения ложных тревог при сохранении требуемой чувствительности и для отчетного контроля краткосрочных рисков в УВД.

Ключевые слова: УВД, эшелонирование, алгоритм краткосрочного предупреждения конфликтов, оценка риска потери эшелонирования, TCPA, DCPA, STCA, индекс риска, ковариация трека.

Sokolov Oleg Arkadievich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

Meshanov Vadim Alekseevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

Panyukov Aleksandr Sergeevich

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

A Methodology for Short-Term Assessment of Loss-of-separation Risk Considering Conflict Geometry and Surveillance Quality in STCA Systems

Abstract. A methodology for short-term assessment of the risk of aircraft separation loss for short-term conflict alert systems (STCA) is presented. An integral risk index in the range of 0-100 is introduced, calculated over a forecast horizon of 60-120 seconds with an update frequency of 1-5 Hz. The index is formed on the basis of normalized indicators of time to closest point of approach (TCPA), the predicted minimum horizontal distance (DCPA – Distance at Closest Point of Approach), the vertical margin relative to the echelon norms, and the scalar indicator of forecast uncertainty based on track filter covariances. The rules for normalizing risk indicators (TCPA, DCPA, vertical margin, uncertainty indicator) and aggregating them into a single index with interpretation by STCA operational attention levels (warning/action) are described. An algorithmic protocol for applying the methodology is provided, including verification on archive tracks with the formation of reference index distributions and adaptation of thresholds for a specific sector (route or terminal). Limitations related to the quality of observations and the linearity of short-term forecasts are discussed. The methodology is designed to unify STCA settings, reduce false alarms while maintaining the required sensitivity, and for reporting control of short-term risks in air traffic control.

Keywords: ATC, separation, short-term conflict warning algorithm, separation loss risk assessment, TCPA, DCPA, STCA, risk index, track covariance.

Введение

Предотвращение нарушений норм эшелонирования является одной из ключевых задач системы обслуживания воздушного движения. Несмотря на развитие автоматизированных средств предупреждения конфликтов, окончательное решение по предотвращению сближения воздушных судов остается за авиадиспетчером, который оценивает степень опасности ситуации качественно – по рабочему опыту, визуальной обстановке и контексту полета [1]. Такая практика ведет к высокой вариативности интерпретации риска и сложности обеспечения единообразия контроля уровня безопасности между секторами и сменами.

В эксплуатационной практике широко распространено ручное или полуавтоматическое отнесение событий к категориям, определяемым нормативными документами, в том числе при расследовании нарушений интервалов эшелонирования, опасных сближений и срабатываний средств автоматизации [2, 3]. Значительная часть оценок проводится экспертами без использования количественных шкал, что создает трудности в объективном сравнении тяжести последствий и в принятии решений по корректировке настроек предупреждающих систем [1]. Особенno проблематичным является отсутствие инструментов для дифференцированного анализа схожих по минимальным дистанциям, но различающихся по динамике конфликта.

Существующие реализации STCA ориентированы на выдачу бинарного предупреждения при достижении фиксированных условий по времени и дистанции сближения [4, 5]. Однако при таком подходе отсутствует унифицированная количественная шкала уровня риска, позволяющая:

- адаптировать чувствительность системы под особенности конкретного сектора;
- формировать отчетные показатели краткосрочных рисков, независимые от субъективной оценки эксперта;
- объективно анализировать динамику риска в разных условиях эксплуатации (по сменам и сезонам).

Дополнительную неопределенность создает качество наблюдений, существенно зависящее от типа источника данных (РЛС, SSR, ADS-B, MLAT), частоты обновления и характеристик трек-фильтра [6, 7]. При ухудшении наблюдаемости геометрические показатели сближения могутискажаться, а это приводит к ложным или пропущенным срабатываниям STCA [4]. В текущей практике влияние качества наблюдений на оценку риска либо не учитывается, либо учитывается неформально на уровне субъективного анализа диспетчера.

С учетом роста загрузки воздушного пространства и перехода к «*проактивному*» управлению безопасностью требуется формализованная методика, обеспечивающая количественную оценку краткосрочного риска еще до фактического нарушения интервалов эшелонирования [8]. Такая методика должна быть воспроизводимой, «*операционно-прозрачной*», и одинаково интерпретируемой в разных секторах.

В настоящей работе предлагается методика краткосрочной оценки риска потери эшелонирования с интегральным индексом (0-100), учитывающим:

- прогнозируемую геометрию конфликта (время и дистанцию до наибольшего сближения);
- текущий вертикальный запас относительно норм эшелонирования;
- неопределенность трека, вычисляемую на основе ковариаций фильтра оценки состояния.

Методика включает формальные правила нормировки показателей риска, алгоритм их агрегирования и протокол применения в двух режимах:

1. Верификационный – настройка порогов на архивных треках;
2. Операционный – мониторинг в реальном времени (включая «*теневой*» режим).

Цель работы – разработать инженерно-ориентированную методику краткосрочной оценки риска потери эшелонирования, обеспечивающую унификацию чувствительности STCA-алгоритмов, сокращение избыточных предупреждений при сохранении надежного выявления опасных ситуаций и поддержку объективного контроля краткосрочных рисков в УВД [8].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходной информации используются синхронизированные треки воздушных судов, которые формируются средствами наблюдения (первичная/вторичная РЛС, MLAT (англ. Multilateration), ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)) в составе автоматизированных систем управления воздушного движения (АС УВД) [6]. Каждый трек содержит оценку текущего состояния воздушного судна (положение и скорость в прямоугольной системе координат) и ковариационную матрицу ошибок фильтра оценки состояния (Фильтр Калмана или другой «трек-фильтр» аналогичного действия), характеризующую степень неопределенности результатов слежения [7]. Частота обновления данных находится в диапазоне 1-5 Гц; горизонт краткосрочного прогноза ограничивается 60-120 с, что соответствует типовым эксплуатационным настройкам модулей краткосрочного предупреждения конфликтов (STCA) [4, 5], а также обеспечивает применимость линейной модели относительного движения на рассматриваемом интервале. Нормативные значения минимальных интервалов эшелонирования по горизонтали и вертикали принимаются в соответствии с действующими российскими и международными требованиями [3, 8], что позволяет адаптировать методику под особенности конкретного сектора и центра организации воздушного движения (ОрВД) без изменения принципов расчета индекса риска, ограничиваясь лишь настройкой параметров порогов и нормировок.

Пусть в момент t_0 известны оценки положения и скорости двух воздушных судов *A* и *B*. Относительное положение и относительная скорость задаются как разности соответствующих оценок.

$$r_0 = r_A - r_B, \quad v_0 = v_A - v_B$$

где: r_A, r_B – векторы положения ВС *A* и *B* в момент времени t_0 , v_A, v_B – векторы скоростей ВС, r_0, v_0 – относительные положение и скорость.

Далее предполагается линейная кинематическая модель краткосрочного относительного движения: прогноз относительного вектора выполняется как сумма начального относительного положения и произведения относительной скорости на время с момента t_0 .

$$\hat{r}(t) = r_0 + v_0 t, \quad t \in [0, T_{\text{пр}}]$$

где: $\hat{r}(t)$ – прогноз относительного положения, $T_{\text{пр}}$ – горизонт прогноза.

На основе прогнозной траектории вводятся классические показатели конфликта: время до наибольшего сближения (TCPA) и прогнозируемая минимальная горизонтальная дистанция (DCPA), определяемые, соответственно, временем, минимизирующим норму прогнозного относительного положения на интервале $[0, T_{\text{пр}}]$, и значением этой нормы в момент TCPA.

$$\text{TCPA} = \arg \min_{t \in [0, T_{\text{пр}}]} |\hat{r}(t)|$$

где: TCPA – время до наибольшего сближения на горизонте прогноза, $|\cdot|$ – евклидова норма.

Если $\text{TCPA} < 0$ – точка наибольшего сближения уже прошла (конфликт был ранее).

Если $\text{TCPA} > T_{\text{пр}}$ – наибольшее сближение за пределами горизонта прогноза, и оценка риска должна опираться на другие компоненты (например, на вертикальный запас и качество наблюдений).

$$\text{DCPA} = |\hat{r}(\text{TCPA})|$$

где: DCPA – прогнозируемая минимальная горизонтальная дистанция между ВС.

Вертикальный запас оценивается как разность между текущим модульной вертикальной дистанцией и нормативом вертикального эшелонирования; отрицательное значение трактуется как *недобор запаса*.

$$\Delta H = |z_A - z_B| - H_{\text{мин}}$$

где: $|z_A - z_B|$ – вертикальная дистанция между ВС, $H_{\text{мин}}$ – установленная нормативная вертикальная разделительная дистанция, ΔH – вертикальный запас (если $\Delta H < 0$, имеет место недобор эшелонирования).

Также отметим, что термин «*approach*» в определениях TCPA/DCPA относится к сближению траекторий и не привязан к фазе захода на посадку; показатели применимы как в маршрутном, так и в терминальном воздушном пространстве [4].

Качество наблюдений учитывается через ковариационную матрицу ошибок трек-фильтра, предоставляемую подсистемой слежения. Для агрегирования многомерной информации об ошибках положения и скорости используется скалярный показатель неопределенности, определяемый, например, как взвешенная сумма следов соответствующих блоков ковариационной матрицы.

$$M_{\text{rel}} = \text{tr}(P_{\text{pos}}) + \kappa \text{tr}(P_{\text{vel}})$$

где: $P_{\text{pos}} \in R^{3 \times 3}$ – ковариационная матрица ошибок определения координат (pos – position «Место») (X, Y, Z); $P_{\text{vel}} \in R^{3 \times 3}$ – ковариационная матрица ошибок определения компонент скорости (Vel – velocity «Скорость») (V_x, V_y, V_z); $\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы, характеризующий суммарную дисперсию ошибок; κ – коэффициент весового учета вклада ошибок скорости, выбираемый при калибровке под характеристики сектора.

Использование следа матриц позволяет получить показатель, удовлетворяющий требованиям инвариантности к повороту координат, низкой вычислительной сложности и прямой интерпретации в терминах суммарной дисперсии наблюдаемого состояния [10]. Значение M_{rel} увеличивается при ухудшении наблюдаемости, росте погрешностей оценки скорости или при появлении быстроменяющихся маневров, что обеспечивает консервативное повышение итоговой оценки риска при снижении достоверности прогноза.

Этот показатель интерпретируется как степень недоверия к геометрическому прогнозу: при росте неопределенности вклад компоненты «*качество наблюдений*» должен увеличивать итоговую оценку риска при прочих равных. Данный подход устраняет типичный для практики недостаток, когда оценка угрозы основывается только на геометрии без учета достоверности данных [3, 9].

Для обеспечения сопоставимости разных компонент в единой шкале каждая из них нормируется в безразмерный отрезок $[0; 1]$ функциями насыщения, определенными с

физически осмысленными порогами. Временная близость \tilde{t} монотонно возрастает при уменьшении TCPA относительно горизонта прогноза; горизонтальная близость \tilde{d}_h монотонно возрастает при уменьшении DCPA относительно установленного минимума; вертикальная безопасность \tilde{d}_v убывает при росте вертикального запаса и быстро насыщается к единице при недоборе относительно нормативного эшелонирования; показатель неопределенности $\tilde{\sigma}$ возрастает с ростом скалярной метрики ошибки слежения.

$$\tilde{t} = 1 - \frac{\min(\text{TCPA}, T_{\text{пр}})}{T_{\text{пр}}}$$

где $\tilde{t} \in [0; 1]$ – нормированная времененная близость.

Чем меньше время до наибольшего сближения TCPA, тем выше значение \tilde{t} , что отражает рост риска при снижении заблаговременности прогноза.

$$\tilde{d}_h = \max\left(0, 1 - \frac{\text{DCPA}}{D_{\text{мин}}}\right)$$

где $\tilde{d}_h \in [0; 1]$ – нормированная горизонтальная близость.

Если прогнозируемая минимальная горизонтальная дистанция DCPA приближается к нормативу $D_{\text{мин}}$ и ниже, показатель стремится к 1, отражая рост вероятности нарушения минимального разделения.

$$\tilde{d}_v = \min\left(1, \max\left(0, 1 - \frac{\Delta H}{H_{\text{мин}}}\right)\right)$$

где $\tilde{d}_v \in [0; 1]$ – нормированная вертикальная близость.

При уменьшении вертикального запаса ΔH относительно нормы показатель растет, достигая 1 при недоборе эшелонирования.

$$\tilde{\sigma} = \min\left(1, \frac{\sigma_{\text{rel}} - \sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}\right)$$

где $\tilde{\sigma} \in [0; 1]$ – нормированная неопределенность наблюдений; $\sigma_{\text{min}}, \sigma_{\text{max}}$ – пороговые значения, определяемые при калибровке.

Рост неопределенности наблюдений M_{rel} приводит к увеличению $\tilde{\sigma}$, что повышает итоговую оценку риска при снижении достоверности прогнозируемой геометрии. Увеличение любого нормированного показателя \tilde{t} , \tilde{d}_h , \tilde{d}_v или $\tilde{\sigma}$ соответствует усилию компоненты риска, а значение 0 означает отсутствие вклада данной компоненты в риск в текущий момент времени.

Нормированные величины далее агрегируются в интегральную оценку риска в единой шкале $[0; 100]$. К нормировочным функциям предъявляются требования ограниченности, монотонности и липшицевой непрерывности, что предотвращает дребезг индекса при малых флуктуациях исходных величин и гарантирует устойчивость к шуму. Выбор параметров нормировок под конкретный сектор (включая характерные значения $T_{\text{пр}}$, $D_{\text{мин}}$, $H_{\text{мин}}$, допустимые задержки обновления) формализуется далее в протоколе калибровки.

Интегральный индекс риска формируется как взвешенная свертка нормированных компонент с последующей ограничивающей (или S-образной) трансформацией в шкалу 0-100.

$$I = 100 \cdot (w_1 \tilde{t} + w_2 \tilde{d}_h + w_3 \tilde{d}_v + w_4 \tilde{\sigma})$$

где: $I \in [0; 100]$ – интегральный индекс риска потери эшелонирования; $\tilde{t}, \tilde{d}_h, \tilde{d}_v, \tilde{\sigma}$ – нормированные показатели временной близости, горизонтальной и вертикальной близости и неопределенности наблюдений; $w_1, w_2, w_3, w_4 \geq 0$ – весовые коэффициенты, подлежащие калибровке под эксплуатационные условия сектора, при условии:

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 1$$

Веса компонент отражают приоритеты эксплуатации: в маршрутном пространстве, как правило, выше значимость горизонтальной геометрии и заблаговременности (TCPA, DCPA), тогда как в терминальной зоне возрастает роль вертикальной компоненты и показателя неопределенности из-за интенсивных маневров. Значение индекса интерпретируется в рамках трехуровневой пороговой логики STCA: уровень внимания (L1), предупредительный (L2) и уровень действия (L3). Пороговые значения задаются по умолчанию и уточняются на этапе секторальной калибровки, при этом сохраняется единая числовая шкала, обеспечивающая сопоставимость отчетных показателей между секторами и сменами. Предложена формализованная шкала интерпретации индекса риска (Табл. 1) для унификации настроек STCA и оценки эксплуатационной эффективности алгоритма.

Таблица 1

Шкала интерпретации интегрального индекса риска краткосрочного конфликта

Уровень STCA	Диапазон индекса I	Состояние воздушной обстановки	Действия диспетчера	Целевые эксплуатационные показатели
L0 – безопасно	$0 \leq I < 30$	Геометрия сближения безопасна, прогноз нарушений отсутствует; неопределенность невысокая	Нормальный мониторинг	Подавляющее большинство ситуаций (>90%) должны оставаться на уровне L0
L1 – повышенное внимание	$30 \leq I < 60$	Наметившееся сближение; возможность нарушения при сохранении текущих траекторий	Усиленный контроль, предварительная оценка конфликта	Доля ложных классификаций допустима при минимальной загруженности диспетчера
L2 – предупреждение (Warning)	$60 \leq I < 80$	Высокая вероятность нарушения минимальных интервалов; требуется подготовка к маневру	Анализ вариантов предотвращения; доклад при необходимости	Цель: минимизировать пропуски событий с последующим нарушением
L3 – действие (Action)	$I \geq 80$	Неизбежное сближение при сохранении траекторий; требуется вмешательство	Изменение эшелона/курса/скорости согласно процедурам STCA	Число событий L3 должно быть минимально и соответствовать фактическим опасным ситуациям

Для исключения «дребезга» индикации используется гистерезис по времени и значению индекса (усреднение в окне 2-5 с и пороговые зазоры при переходах между уровнями).

Калибровка параметров нормировок, весов и порогов выполняется по архивным выборкам с метками «нарушение/без нарушения», а при отсутствии доступа к архивам – на

имитационных наборах, воспроизводящих характерные геометрии конфликтов и профили неопределенности наблюдений. На этапе калибровки оцениваются показатели чувствительности и избирательности методики на размеченных архивных данных. Пороговые значения уровней L1/L2/L3 выбираются таким образом, чтобы можно было обеспечить требуемый баланс между долями ложных и пропущенных срабатываний для конкретного сектора. Оценка качества настройки индекса проводится на основе набора эксплуатационных метрик, приведенных в табл. 2.

95-й перцентиль индекса для безопасных событий определяется как значение, ниже которого находятся 95% наблюдений данного класса и которое отражает верхнюю границу вероятных величин индекса при отсутствии угрозы.

В отличие от качественных схем экспертной классификации тяжести событий, предлагаемая процедура задает воспроизводимый протокол настройки, применимый в разных центрах ОрВД и версиях программного обеспечения, а также пригодный для отчетного контроля динамики краткосрочных рисков.

Алгоритмическая схема функционирования модуля включает предобработку треков (согласование систем координат и фильтрацию выбросов), выбор пар кандидатов по окну близости, краткосрочный прогноз относительного движения, расчет TCPA, DCPA и вертикального запаса, извлечение и свертку ковариационной информации в показатель неопределенности, нормировку компонент и агрегирование в индекс, применение пороговой логики STCA и регистрацию событий. Общая последовательность обработки данных представлена на блок-схеме в виде табл. 3, где показан поток вычислений от входа треков и ковариаций до формирования индекса риска и уровня оперативного внимания.

Таблица 2
Показатели качества и метрики калибровки интегрального индекса риска

Метрика	Обозначение	Интерпретация	Область применения	Типичные ориентиры (En-Route)
Доля событий уровня L0	p_{L0}	Нормальный фон потока, ситуации без признаков опасного сближения	Контроль общей стабильности системы; мониторинг загрузки сектора	> 85-90 % от всех событий
Доля событий уровня L1	p_{L1}	Начальные проявления риска; требуется повышенное внимание	Диагностика настройки чувствительности; индикатор увеличения нагрузки	5-10 %; растет при сложной погоде/нагрузке
Доля событий уровня L2	p_{L2}	Предупреждающие ситуации	Отображение для подготовки к действиям	1-3 %; отслеживаются по сменам
Доля событий уровня L3	p_{L3}	Ситуации, требующие немедленного вмешательства	Анализ реальных опасных сближений; контроль БП	0,1-0,5 %; стремиться к минимуму
Доля ложных срабатываний	p_{FP}	Выдан сигнал при отсутствии угрозы	Измерение избирательности порогов	$\leq 5-10$ % от событий L2/L3
Доля пропущенных опасных событий	p_{FN}	Опасные конфликты, не распознанные системой	Ключевой показатель безопасности	$\leq 1-2$ % от реальных нарушений

Разделимость классов по индексу	d_{sep}	Насколько индексы безопасных и опасных событий разведены по значениям	Контроль эффективности весов и нормировок	> 20-30 пунктов средней разницы
95-й перцентиль индекса для «безопасного» класса	I_{95}^{safe}	Верхняя граница распределения индекса для событий без нарушения	Контроль устойчивости и консервативности	$\leq L1$ -порога
5-й перцентиль индекса для «опасного» класса	I_5^{haz}	Нижняя граница для событий с нарушением интервалов	Проверка своевременности реакции	$\geq L2$ -порога
Устойчивость к ухудшению наблюдений	k_σ	Реакция индекса на рост неопределенности трека	Проверка надежности при падении качества данных	Индекс должен расти монотонно и предсказуемо
Оценка соответствия требованиям сектора	P_{conf}	Инженерная экспертная подпись на основе совокупности метрик	Итоговый допуск конфигурации порогов	Соответствие эксплуатационным критериям

С вычислительной точки зрения базовая сложность перебора пар бортов имеет квадратичный характер по числу сопровождаемых целей, однако на практике используется пространственная индексация (ячейки/деревья) и ограничение радиуса поиска, что обеспечивает масштабируемость при штатной загрузке сектора.

Ограничения методики связаны с допущением линейной кинематики на горизонте прогноза, корректностью и полнотой ковариационной информации, а также с возможными задержками и пропусками обновлений. Эти факторы учитываются консервативным повышением индекса при росте неопределенности, а также применением задержки на переключение уровней, чтобы исключить частые колебания предупреждений. В терминальной зоне, где велика доля маневров, рекомендуется укороченный горизонт прогноза и соответствующая перенастройка порогов, в то время как для маршрутного пространства целесообразны более длительные горизонты и мягкие пороги.

Таблица 3

Алгоритмическая схема работы модуля краткосрочной оценки риска потери эшелонирования

№ Этапа	Этап обработки	Основные операции и используемые данные	Выход
1	Сбор и синхронизация данных	Источники наблюдений: РЛС/SSR/MLAT/ADS-B; трек-фильтр (оценка состояния \hat{x} , ковариации P); нормы эшелонирования D_{\min}, H_{\min} ; синхронизация по UTC	Согласованные треки и параметры сектора

2	Предобработка	Согласование систем координат (ENU / плоская); фильтрация выбросов; выравнивание частоты обновления (буферизация/интерполяция)	Приведенные и очищенные треки
3	Отбор пар кандидатов	Пространственная индексация (поиск ближайших целей в 2D-плане); проверка, что горизонтальная дистанция не превышает R, а вертикальная разность $ \Delta H $ находится в допустимых пределах.	ΔH
4	Краткосрочный прогноз	$r_0 = r_A - r_B, v_0 = v_A - v_B; \hat{r}(t) = r_0 + v_0 t, t \in [0, T_{\text{пр}}]$	Прогноз относительного движения
5	Геометрия конфликта	$TCPA = \arg \min_{t \in [0, T_{\text{пр}}]} \hat{r}(t) ; DCPA = \hat{r}(TCPA) ;$ Вертикальный запас ΔH	Показатели сближения
6	Качество наблюдений	Матрица ковариаций P ; $M_{\text{rel}} = \text{tr}(P_{\text{pos}}) + \kappa \text{tr}(P_{\text{vel}})$	Показатель неопределенности
7	Нормировки	$\tilde{t} = \varphi_t(TCPA; T_{\text{пр}}); \tilde{d}_h = \varphi_h(DCPA; D_{\text{мин}}); \tilde{d}_v = \varphi_v(\Delta H; H_{\text{мин}}); \tilde{\sigma} = \varphi_{\sigma}(M_{\text{rel}})$	Безразмерные компоненты риска $[0; 1]$
8	Интегральный индекс риска	$S = w_1 \tilde{t} + w_2 \tilde{d}_h + w_3 \tilde{d}_v + w_4 \tilde{\sigma}; I = 100 \cdot f(S)$	Индекс риска $I \in [0; 100]$
9	Пороговая логика и гистерезис	Определение L1 / L2 / L3; сглаживание (2-5 с); зазоры при переключении уровней	Уровень STCA: внимание / предупреждение / действие
10	Выход на АРМ	Индикация (I, уровень, пара ВС, таймер); звуковое оповещение	Информация диспетчеру
11	Логирование и метрики	Запись: I, уровни, пары ВС, ковариации; FP/FN; латентность; доли L-уровней	Данные для контроля эффективности
12	Калибровка и верификация	Архивные/имитационные наборы с метками; ROC/PR-кривые; подбор w_i , порогов L1/L2/L3	Адаптированные параметры под сектор

В совокупности описанные элементы образуют инженерно-ориентированную методику краткосрочной оценки риска, в которой геометрия сближения дополняется формализованным учетом качества наблюдений. Это позволяет унифицировать настройку чувствительности STCA в разных секторах, снизить долю избыточных предупреждений при сохранении требуемой надежности обнаружения опасных ситуаций и обеспечить сопоставимый отчетный контроль краткосрочных рисков в системе обслуживания воздушного движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение методики краткосрочной оценки риска потери эшелонирования позволило формализовать процесс раннего обнаружения опасного развития конфликта и обеспечить воспроизводимость интерпретации уровня риска для различных эксплуатационных условий. На основании анализа характеристик нормировок, весовых коэффициентов интегрального индекса и пороговой логики STCA установлено следующее.

Во-первых, методика обеспечивает разделимость типов событий по интегральному индексу риска. Ситуации, приводившие к фактическому нарушению нормативных интервалов эшелонирования, соответствуют значениям индекса в диапазонах L2-L3, тогда как штатные пролеты с достаточным запасом по горизонтали и/или вертикали имеют значения, концентрирующиеся в зоне L0-L1. Индекс позволяет оперативно выделять потенциально опасные сближения еще до фактического нарушения норм, сохраняя единообразную количественную шкалу оценки.

Во-вторых, учет показателя неопределенности наблюдений приводит к росту индекса риска при ухудшении достоверности данных, даже при неизменной геометрии сближения. Такой механизм обеспечивает консервативность принятия решения в условиях пропусков обновлений, неоднородности покрытия или временных сбоев в источниках наблюдений, что важно при высокой загрузке сектора.

В-третьих, взвешенная свертка нормированных показателей дает возможность регулировать вклад каждого фактора риска под специфику воздушного пространства. В маршрутных секторах приоритет имеют заблаговременность предсказания и минимальная горизонтальная дистанция, в терминальной зоне возрастает роль вертикального запаса и качества наблюдений из-за интенсивных маневров. Методика сохраняет единую шкалу индекса (0-100) при локальной адаптации порогов L1-L3 под сектор.

Дополнительно отмечено, что индекс чувствителен не только к величине прогнозируемой минимальной дистанции, но и к скорости ее уменьшения, что позволяет раньше фиксировать развитие опасного конфликта. Пороговая логика с гистерезисом и временным усреднением снижает долю ложных тревог, устранивая кратковременные колебания индикации при сохранении устойчивости предупреждений по реально опасным сценариям. Такой подход соответствует эксплуатационным требованиям STCA и уменьшает нагрузку на диспетчера.

Предложенная методика обеспечивает:

- проактивное обнаружение развивающихся конфликтов;
- количественную оценку уровня риска по единой шкале;
- учет качества наблюдений в критерии опасности;
- воспроизводимую адаптацию порогов под особенности воздушного пространства;
- снижение ложных предупреждений при сохранении требуемой чувствительности.

Полученные результаты подтверждают практическую применимость методики в составе инструментов краткосрочного предупреждения конфликтов и позволяют рекомендовать ее для использования в эксплуатационных испытаниях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Научная новизна исследования

Предложена методика автоматизированной количественной оценки краткосрочного риска потери эшелонирования, ориентированная на использование в системах краткосрочного предупреждения конфликтов STCA. Впервые в критерий опасного сближения авиационных судов интегрирован показатель неопределенности наблюдений, формируемый на основе ковариаций трек-фильтра, что повышает надежность принятия решения при ухудшении качества данных и позволяет учесть эксплуатационные условия обслуживания воздушного движения.

Использование единой нормированной шкалы 0-100 обеспечивает возможность математического сопоставления тяжести различных типовых событий: нарушений интервалов эшелонирования, краткосрочных конфликтных ситуаций, потенциально конфликтных ситуаций и иных случаев отклонений траекторий. В отличие от бинарных логик STCA, интегральный индекс риска отражает динамику развития конфликта и позволяет фиксировать опасные тенденции еще до фактического нарушения норм.

Методика ориентирована на полностью автоматический расчет, что делает возможным непрерывный мониторинг воздушной обстановки в режиме реального времени,

исключает субъективность оценки и формирует основу для единообразного контроля уровня безопасности полетов в различных секторах и центрах ОрВД.

В совокупности признаки новизны заключаются в:

- учете качества наблюдений как обязательного компонента риск-оценки;
- формализации краткосрочного прогноза с интерпретацией в единой количественной шкале;
- параметризации критериев под эксплуатационные особенности конкретного воздушного пространства.

Практическая значимость исследования

Методика создает основу для объективной и сравнимой оценки угрозы сближения авиационных судов при анализе действий диспетчеров УВД, в том числе при расследовании инцидентов и формировании отчетности по краткосрочным рискам. Количественные значения индекса позволяют проводить сопоставление уровня риска между секторами, регионами и сменами, а также отслеживать изменения во времени при корректировке настроек STCA-алгоритмов.

В отсутствие опасных авиационных событий методика обеспечивает ненулевые индикаторы состояния безопасности, поскольку учитывает потенциально конфликтные сценарии. Это создает дополнительные возможности для управления безопасностью: риски выявляются ранее, чем возникают фактические нарушения, что соответствует современным подходам к развитию систем управления безопасностью полетов (СУБП).

Кроме того, количественная дифференциация уровня риска предоставляет инструмент для объективной оценки действий диспетчера при разрешении конфликтной ситуации: чем выше индекс, тем выше потенциальная серьезность последствий и степень ответственности за допущенное отклонение. Данная характеристика может применяться как в реальной эксплуатации, так и в процессе тренажерной подготовки и поддержания квалификации персонала УВД.

Дополнительная область применения оптимизация настроек STCA. Анализ распределений индекса по событиям позволяет подстраивать чувствительность порогов под реальные эксплуатационные условия без потери устойчивости предупреждений. Это способствует снижению числа ложных тревог, уменьшению психологической нагрузки на персонал и, как следствие, более эффективному использованию пропускной способности воздушного пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика краткосрочной оценки риска потери эшелонирования воздушных судов с использованием интегрального индекса в диапазоне 0-100, формируемого на основе нормированных показателей геометрии сближения и показателя неопределенности наблюдений по ковариациям трек-фильтра. Разработка обеспечивает количественную оценку угрозы в реальном времени, учитывает качество данных и позволяет адаптировать чувствительность порогов под особенности конкретного воздушного пространства при сохранении единой шкалы интерпретации уровня риска.

Проведенный анализ показал возможность надежного выделения опасно развивающихся конфликтов еще до фактического нарушения установленных норм эшелонирования и устойчивость индекса к флуктуациям наблюдений благодаря гистерезису и учету неопределенности. Методика открывает возможности для унификации настроек систем краткосрочного предупреждения конфликтов, снижения доли ложных тревог и повышения объективности оценки уровня краткосрочных рисков при контроле безопасности полетов.

Дальнейшее развитие может быть связано с уточнением весовых коэффициентов и параметров нормировки по данным конкретных секторов, а также с расширением набора учитываемых признаков за счет динамической оценки маневров воздушных судов и факторов, связанных с топологией воздушного пространства.

Список источников

1. Плясовских А. П., Винников К. И., Топилин В. В. Методическая оценка опасности сближения при нарушении интервалов эшелонирования // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 4(43). С. 59–70. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-avtomaticheskoy-otsenki-opasnosti-sblizheniya-vozdushnyh-sudov-pri-narushenii-intervalov-eshelonirovaniya/viewer> (дата обращения: 25.10.2025).
2. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 (в действующей ред.). — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98957/ (дата обращения: 27.10.2025).
3. ФАП-293. Организация воздушного движения в Российской Федерации : приказ Минтранса РФ от 25.11.2011 № 293 (в действующей ред.). — URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/f/6/3/f/a/f63fa58e790cf8642346e5a83018986a.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
4. EUROCONTROL. Specification for Short Term Conflict Alert (STCA). Edition 1.0. 2007. 56 р. — URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-specifications-short-term-conflict-alert-stca> (дата обращения: 27.10.2025).
5. EUROCONTROL. Guidelines for Short Term Conflict Alert (STCA), EUROCONTROL-GUID-159, Parts I–III. Edition 1.0. 2017. — URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-09/eurocontrol-guidelines-159-part-iii-1.0.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
6. Бестугин А. Р., Филин А. Д., Санников В. А. Автоматизированные системы управления воздушным движением: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2024. 94 с. — URL: <https://urait.ru/book/avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-vozdushnym-dvizheniem-545080> (дата обращения: 27.10.2025).
7. Шахтарин Б. И. Фильтры Винера и Калмана: учеб. пособие. М.: Горячая линия — Телеком, 2016. 396 с. (дата обращения: 27.10.2025).
8. ICAO. Safety Management Manual (SMM), Doc 9859. 4th ed. Montréal: ICAO, 2018. — URL: <https://sassofia.com/wp-content/uploads/2023/01/icao-sms-4th-edition.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
9. ICAO. Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM), Doc 4444. 16th ed. Montréal: ICAO, 2016. — URL: <https://аэростандарт.рф/en/icao/book/doc-4444-procedures-for-air-navigation-services-air-traffic-management-ed-16-en-12507-2022-11-03> (дата обращения: 27.10.2025).
10. Степанов О. А. Методы обработки навигационной информации: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2017. 196 с. — URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2217.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Мещанов Вадим Александрович, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Панюков Александр Сергеевич, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sokolov Oleg Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department No. 13 ‘Automated Control Systems’, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

Meshchanov Vadim Aleksandrovich, 3rd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Panyukov Alexander Sergeevich, 3rd year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.