

Конкурс «Авиастроитель года» по итогам 2023 г.

Номинация «За создание новой технологии»

Конкурсная работа

**«Разработка технологии интеллектуальной поддержки экипажа в части решения задачи реконфигурации пространственно-временного графика полета воздушного судна в зоне действия угроз и сложных условиях»**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Безопасность выполнения полетов воздушных судов (далее – ВС) определяется совокупностью внешних воздействий, технических характеристик ВС и обеспечивающих систем, а также возможностями экипажей и служб управления воздушным движением по предотвращению развития негативных сценариев. В свою очередь, возможности экипажей по парированию внешних угроз (атмосферные возмущения, природные и техногенные катастрофы, военные действия и др.) в условиях высокой загрузки различными функциональными задачами во многом определяются степенью автоматизации решения задач на борту в процессе выполнения полета, в том числе прогнозирования развития критических ситуаций и выработки рациональных решений по управлению ВС в особых условиях.

Согласно статистическим данным [1] до 50% всех авиационных происшествий и катастроф происходит из-за ошибок пилотирования при потере управляемости самолета. Это происходит прежде всего из-за высокой ограниченности времени на анализ текущей ситуации и принятие решения в рамках полета сквозь опасные зоны с учетом запретных зон, а также из-за отсутствия соответствующего методического аппарата для автоматизации выбора траектории полета как у службы УВД, так и на борту ВС.

Разработка технологии была начата в инициативном порядке в 2015 году

и успешно применена в ряде похожих работ смежной направленности. В 2022 году технология была адаптирована для задач гражданской авиации и успешно интегрирована в работу в рамках НИР «СГС-Т2.2-ГосНИИАС».

### **Назначение технологии**

Технология автоматизированного решения задачи поддержки принятия решений экипажем ВС по изменению маршрута и высотно-скоростного режима полета (далее – технология ППР) предназначена для решения задачи реконфигурации пространственно-временного графика полета (далее – ПВГП) ВС при пролете через опасные зоны, полете в сложных условиях и с учетом прогноза развития внешних и внутренних негативных ситуаций.

Технология ППР обеспечивает решение следующих задач:

- разработка общей методики создания бортовых алгоритмов решения задач оптимизации ПВГП ВС при выполнении полета с учетом опасных и запретных зон различного происхождения, сложных условий и наличия особых случаев аэронавигации;
- разработка эталонных моделей оценки угроз и необходимости корректировки маршрута;
- разработка эталонной модели реконфигурации маршрута с учетом опасных и запретных зон различного происхождения, сложных условий и наличия особых случаев аэронавигации;
- разработка оперативных бортовых алгоритмов на основе системы эталонных моделей с учетом требований и протоколов информационного взаимодействия прототипов бортового радиоэлектронного оборудования (далее – БРЭО).

Основной задачей технологии является разработка оперативных бортовых алгоритмов решения задачи реконфигурации маршрута ВС с учетом опасных и запретных зон различного происхождения, сложных условий и наличия особых случаев аэронавигации с целью недопуска либо снижения риска возникновения критических ситуаций при полете по маршруту.

## **Общая концепция технологии**

В настоящее время процессы оценки состояния ВС, внешней обстановки и реализуемости текущего плана полета, а также выработки и принятия решения на борту ВС по изменению плана полета являются наименее автоматизированными из всех процессов управления ВС.

При полете в сложных условиях экипаж ВС испытывает информационную и интеллектуальную нагрузку, близкую к предельной по их возможностям, которая обусловлена:

- большим объемом, динамичностью, многофакторностью, противоречивостью и неопределенностью (нечеткостью) информации, поступающей на борт самолета;
- высокой вероятностью появления и множественностью угроз, не предусмотренных планом полета и требующих оперативного принятия решений по парированию угроз и их реализации;
- малым располагаемым ресурсом времени для оценки ситуации и принятия решений по способам парирования угроз.

Таким образом сформировалась проблемная ситуация, связанная с необходимостью реализации на борту ВС функции поддержки принятия решений (ППР) экипажем при анализе обстановки, выявлении угроз и выработке решений по парированию выявленных угроз.

Общая схема реализации функции поддержки принятия решений экипажа приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общая схема реализации функции поддержки принятия решений экипажа

Общая схема формирования решений при реализации функции интеллектуальной поддержки экипажа на всех этапах полета включает четыре основных этапа:

- анализ текущей ситуации, выявление и ранжирование угроз и определение необходимости изменения текущего плана полета;
- формирование альтернативных вариантов парирования угроз и перечня оптимизируемых параметров;
- сравнительный анализ альтернативных вариантов поведения и оптимизация параметров по выбранному критерию эффективности;

– формирование предложений экипажу ВС по изменению плана полета.

Функция поддержки принятия решений экипажем ВС при анализе внешних угроз и выработке решений по их парированию реализуется в виде функционального программного обеспечения, реализующего соответствующие алгоритмы.

К бортовым алгоритмам анализа угроз и выработки решений предъявляются требования оперативности (ввиду дефицита времени) и малой ресурсоемкости (ввиду ограниченности вычислительных ресурсов бортовых вычислительных систем).

Концепция формирования бортовых алгоритмов, реализующих функцию поддержки принятия решений экипажем ВС при анализе внешних угроз и выработке решений по их парированию представлена на рисунке 2.

Процесс разработки оперативных бортовых алгоритмов включает два основных этапа:

– этап формирования «эталонных» моделей, «эталонных» алгоритмов и «эталонных» решений без учета ограничений на время и ресурсоемкость;

– этап разработки оперативных бортовых алгоритмов с учетом ограничений на время решения задачи, располагаемые вычислительные ресурсы и информационное обеспечение.

Под «эталонными» методами и алгоритмами понимаются методы и алгоритмы решения задачи оптимизации ПВГП в поле потенциальных угроз, понимаются методы и алгоритмы, позволяющие гарантированно получить решение, удовлетворяющее требованиям точности и достоверности.

«Эталонный» метод решения задачи оптимизации ПВГП должен обеспечить нахождение глобального экстремума задачи оптимального управления в условиях ограничений за конечное время. Перечисленным требованиям удовлетворяет метод динамического программирования, который выбирается в качестве «эталонного».

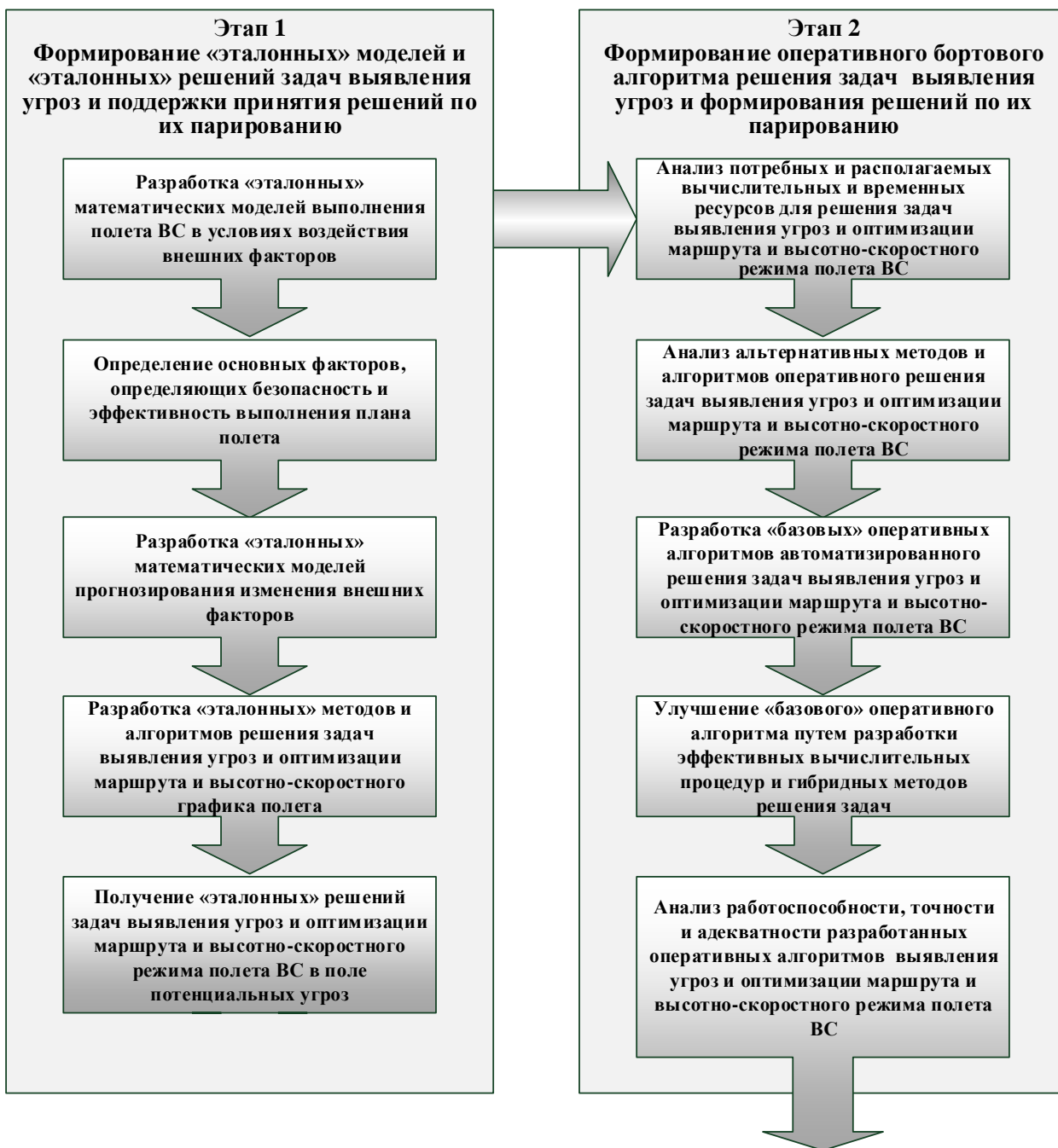


Рисунок 2 – Технология формирования бортовых алгоритмов, реализующих функцию поддержки принятия решений экипажем ВС при анализе внешних угроз и выработке решений по их парированию

«Эталонные» решения необходимы для тестирования, верификации и валидации оперативных алгоритмов. Следовательно, «эталонные» решения должны быть получены на широком множестве исходных данных, характеризующих область применения оперативных алгоритмов.

На этапе разработки оперативных бортовых алгоритмов выявления и прогнозирования развития угроз и оптимизации ПВПП ВС проводятся

следующие операции:

- анализ потребных и располагаемых вычислительных и временных ресурсов для решения задач на борту ВС;
- выбор (разработка) и сравнительный анализ альтернативных оперативных методов и алгоритмов решения задачи;
- разработка «базовых» оперативных алгоритмов решения задач,
- улучшение «базовых» оперативных алгоритмов путем разработки эффективных вычислительных процедур и гибридных методов решения задач,
- анализ работоспособности, точности и адекватности разработанных бортовых алгоритмов.

### **Общая классификация угроз**

Опасные и запретные зоны являются зонами потенциальной опасности и классифицируются в соответствии с Федеральными правилами [2, 3]:

1. Запретные зоны, устанавливаемые для защиты от вредных воздействий и разрушений, возникающих в результате возможных происшествий в воздушном пространстве на следующих объектах:

- важные государственные объекты;
- ключевые промышленные комплексы (атомные электростанции, ядерно-радиационные объекты, химически опасные объекты, другие особо важные объекты с точки зрения национальной безопасности страны).

2. Опасные зоны, устанавливаемые для использования как на определенный период времени (временные опасные зоны), так и для обеспечения деятельности, осуществляемой на постоянной основе (постоянные опасные зоны) в ряде следующих объектов:

- в воздушном пространстве РФ в районах лесных пожаров и вулканической деятельности;
- в воздушном пространстве РФ в промышленных районах с постоянной повышенной задымленностью;
- над открытым морем в интересах следующих видов деятельности:

- обеспечение запуска и посадки космических объектов;
- проведение поисково-спасательных работ;
- выполнение ракетно-артиллерийских стрельб на полигонах боевой подготовки Военно-Морского Флота;
- выполнение полетов на испытания, исследования авиационной и ракетной техники, на установление рекордов;
- проведение учений, показов новой военно-морской техники;
- обеспечение пусков и падения ракет, падения их отделяющихся частей.

3. Зоны ограничения полетов, устанавливаемые в воздушном пространстве РФ в районах (объектах) с временными или иными ограничениями для полетов воздушных судов, такими как:

- государственные природные заповедники;
- национальные парки;
- памятники истории и культуры;
- охраняемые объекты;
- зоны интереса следующих видов деятельности:
- проведение на полигонах стрельб, пусков ракет, бомбометаний, десантирования;
- проведение противораковых стрельб;
- проведение работ с боеприпасами на объектах их хранения;
- осуществление научных исследований в атмосфере;
- проведение взрывных работ;
- выполнение полетов в специальных зонах вне районов аэродромов (вертодромов).

Использование воздушного пространства в запретных зонах и зонах ограничения полетов запрещается, за исключением:

- использование воздушного пространства лицами, в интересах которых установлены такие зоны;

- выполнения полетов на перехват воздушных судов-нарушителей, а также выполнения других оперативных заданий в интересах государства;
- выполнения полетов в целях проведения поисково-спасательных работ и работ по оказанию помощи при чрезвычайных ситуациях;
- выполнения полетов воздушных судов, осуществляемых в соответствии со специальными международными договорами.

Если пролет через запретные зоны категорически запрещен, то необходимость пролета через опасные зоны определяется командиром экипажа.

Опасные зоны, как правило, задаются координатами граничных точек и не дифференцированы по степени опасности.

К полетам в особых условиях относятся:

- полеты при неблагоприятных атмосферных условиях;
- полеты в горной местности;
- при безопасной высоте полета 3000 м и более, на малых и предельно малых высотах;
- полеты по ПВП над безориентирной местностью, если основным средством навигационной ориентировки является визуальная ориентировка;
- полеты по ПВП в полярных районах, над пустынями и джунглями;
- полеты по ПВП над водным пространством;
- полеты по ПВП в условиях сложной орнитологической обстановки.

К неблагоприятным атмосферным условиям относятся:

- грозовая деятельность;
- сильные осадки;
- повышенная электрическая активность атмосферы;
- обледенение;
- турбулентность;
- сдвиг ветра;

- облака вулканического пепла;
- пыльные и песчаные бури.

Степень опасности (риски) полетов в сложных условиях определяется интенсивностью воздействия негативных факторов на ВС и техническим состоянием ВС и его подсистем.

### **Концепция оценки угроз**

Поскольку степень опасности полета ВС через опасные зоны или области пространства со сложными условиями пропорционально времени пребывания в этих зонах, то в качестве критерия оптимизации маршрута и высотно-скоростного режима полета наиболее часто используется именно время пребывания в зонах. Такой подход достаточно хорошо работает в тех случаях, когда опасные зоны (пространственные области локализации внешних угроз) изолированы и возможен их обход (облет).

Предварительные исследования показывают, что в случае перекрытия опасных зон и дифференциального описания степени угроз внутри каждой зоны в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать так называемую функцию потенциальной опасности  $f_{\text{ПО}}^k$ , характеризующую среднее количество критических воздействий внешних факторов на ВС, приходящееся на элементарный участок траектории с заданными координатами.

Построение функций потенциальной опасности для каждого типа угрожающих факторов является самостоятельной наукоемкой задачей, которая в настоящее время находится в разработке.

Наиболее отработан вопрос построения функций потенциальной опасности при полете через зоны атмосферной турбулентности.

Общая схема построения функции потенциальной опасности зон атмосферной турбулентности приведена на рисунке 3.

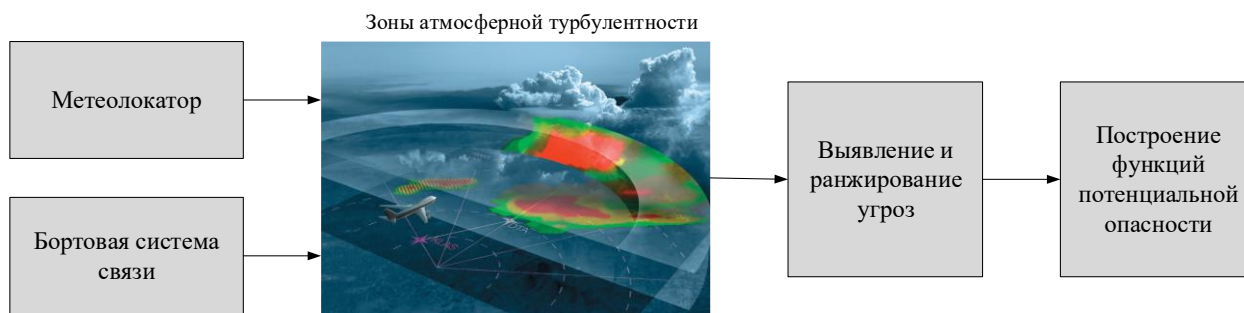


Рисунок 3 – Общая схема построения функции потенциальной опасности зон повышенной турбулентности атмосферы

В соответствии с ОСТ 1 02514-84 [4] представление атмосферной турбулентности, влияющей на ВС в полете, базируется на условных схемах, наиболее распространенными из которых являются схемы непрерывной турбулентности и дискретных порывов.

В основу модели непрерывной турбулентности атмосферы положены следующие предположения и допущения:

- атмосфера представляет собой совокупность спокойных участков и турбулентных зон со случайно изменяющимися размерами;
- в турбулентных зонах изменение по времени составляющих скоростей порывов воздуха является стационарным процессом с дисперсией, меняющейся от зоны к зоне;
- в общем виде турбулентность атмосферы представляет собой случайный локально-нормальный процесс;
- турбулентность атмосферы считается изотропной.

Скорость движения воздуха в атмосфере  $\vec{U} = \vec{U}(x_g, y_g, z_g, t)$  является векторной случайной функцией векторного аргумента, состоящего из координат точки атмосферы и времени, то есть является векторным случайным полем.

Величина  $\vec{U}$  может быть представлена в виде суммы вектора ветра  $\vec{U}$  и центрированной составляющей  $\Delta\vec{U}$ :

$$\vec{U} = \bar{\vec{U}} + \Delta\vec{U}, \quad (1)$$

Под  $\bar{\vec{U}}$  понимается среднее по некоторому интервалу времени значение

скорости движения воздуха в рассматриваемой точке. Наличие  $\Delta\vec{U}$  означает турбулентность атмосферы – хаотическое ее движение без регулярной составляющей.

Вектор случайной составляющей скорости движения воздуха, как и полный вектор  $\vec{U}$ , проектируется на различные системы координат, в частности на связанные оси:

$$W_x = V_x + U_x; \quad W_y = V_y + U_y; \quad W_z = V_z + U_z. \quad (2)$$

Центрированную случайную составляющую  $\Delta\vec{U}$  при изотропной турбулентности атмосферы можно рассматривать в любой системе координат.

Корреляционные функции случайных процессов  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$ , как и другие статистические характеристики атмосферной турбулентности, определяются эмпирически путем обработки экспериментальных данных.

Атмосфера считается практически спокойной, если  $\sigma_{\Delta U} < 0,5 \text{ мс}^{-1}$ , и сильно возмущенной, если  $\sigma_{\Delta U} > 2,5 \text{ мс}^{-1}$ . В пилотажных задачах обычно принимают  $100 \text{ м} \leq L \leq 1000 \text{ м}$ .

Для учета ветра и турбулентности атмосферы в уравнениях движения ВС используются кинематические соотношения в связанных осях:

$$W_x = V_x + U_x; \quad W_y = V_y + U_y; \quad W_z = V_z + U_z, \quad (3)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора воздушной скорости,  $U_x, U_y, U_z$  – проекции вектора скорости движения воздуха.

Влияние ветра и турбулентности на движение ВС удобно рассматривать с использованием линеаризованных уравнений динамики ВС (уравнений в вариациях). В рамках линейных моделей в малых отклонениях справедлив принцип суперпозиции.

Количество критических воздействий возмущенной атмосферы на ВС можно интерпретировать как количество выбросов случайных процессов изменения некоторых параметров движения ВС в зонах атмосферной турбулентности.

Считается, что движение ВС в турбулентной атмосфере описывается  $n$ -

мерным случайным процессом  $\vec{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))^T$ . Будем считать, что для некоторых (интересующих нас) составляющих определены уровни  $x_{i0}$ , превышение которых приводит к возникновению опасных ситуаций. Обозначим через  $N_i^+$  – случайное число пересечений составляющей случайного процесса  $X_i(t)$  уровня  $x_{i0}$  снизу вверх.

Количество критических воздействий возмущенной атмосферы на ВС можно интерпретировать как количество выбросов (число пересечений снизу-вверх) случайных процессов изменения параметров движения ВС (например, угла атаки, угла крена, скорости изменения угла крена и др.).

В соответствии с теорией выбросов случайных процессов [5-7] среднее число пересечений снизу вверх уровня  $u$  на интервале  $(t_0, T)$  определяется выражением

$$N^+(t_0, T) = \int_{t_0}^T dt \int_0^{\infty} y f_t(u, y) dy, \quad (4)$$

где  $f_t(u, y) = f_t(x, y)|_{x=u}$  – плотность совместного распределения случайных величин  $X(t)$  и  $Y(t)$ , где  $Y(t) \equiv \frac{dX(t)}{dt}$  – производная в среднеквадратичном процессе  $X(t)$ .

Таким образом, для оценки среднего числа пересечений параметрами движения ВС пороговых значений необходимо знать совместную плотность распределения  $f_t(x, y)$ .

Для получения этой плотности можно воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Формируются системы линеаризованных уравнений продольного и бокового движения со случайными составляющими порывов ветра в правых частях.
2. Полученная система стохастических уравнений преобразуется к канонической форме вида.

$$\dot{Y} = D(t)\varphi(Y, t) + h(Y, t)V(t), \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (4)$$

где  $Y(t)$ ,  $V(t)$  – векторы-столбцы,  $\varphi(Y, t)$  – векторная детерминированная функция,  $h(Y, t)$  – матричная детерминированная функция фазовых переменных.

3. На основе канонической системы определяются матрица диффузии  $A_k$  и коэффициенты сноса  $B_{kl}$  системы уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова для многомерного распределения  $\omega(y, t)$  фазовых координат воздушного судна внутри области турбулентности [7]

$$\frac{\partial \omega(y, t)}{\partial t} = - \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial y_k} [A_k(y, t)\omega(y, t)] + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\partial^2}{\partial y_k \partial y_l} [B_{kl}(y, t)\omega(y, t)]. \quad (5)$$

4. Используя приближенную гауссовскую аппроксимацию, формируются системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{m}(t) &= Am(t), \\ \dot{\sigma}(t) &= 2A\sigma(t) + B^2. \end{aligned} \quad (6)$$

для математических ожиданий и СКО гауссовского приближения.

5. На основе решения дифференциальных уравнений для моментов в каждый момент времени формируются искомые плотности распределений  $f_i(x, y)$ , на основе которых определяется количество пересечений случайными процессами изменения параметров движения установленных пороговых значений.

Для каждого участка постоянства интенсивностей атмосферной турбулентности на линии пути ВС формируется функция потенциальной опасности  $f_{\text{ПО}}(\chi_{\text{ВС}}, Q_{\text{ОЗ}})$ , как среднее число пресечений параметрических пороговых значений, приходящееся на единицу длины линии пути ВС в опасной зоне (рисунок 4).

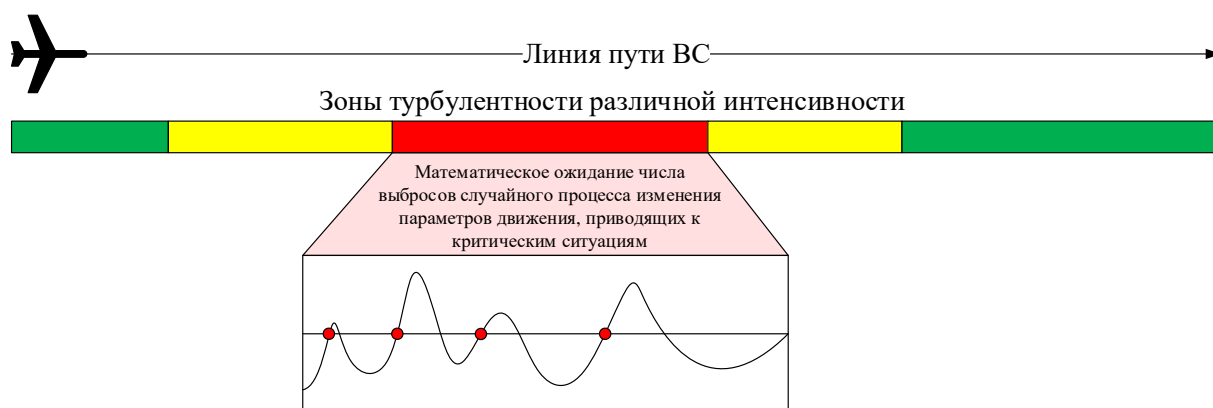


Рисунок 4 – Определение потенциальной опасности элементов траектории ВС

Пример визуализации анализа пространства с учетом зоны турбулентности приведен на рисунке 5.

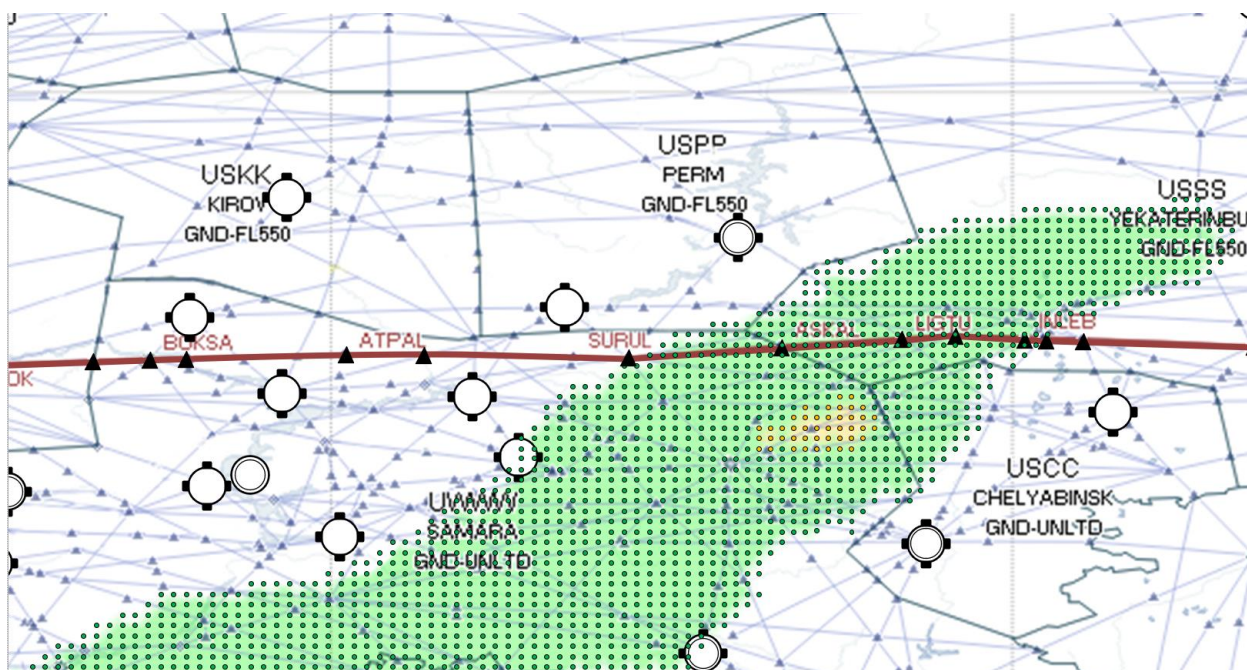


Рисунок 5 – Визуализация анализа воздушного пространства с учетом турбулентности

При полете в сложных условиях также существует вероятность возникновения критической ситуации, связанной с другими участниками воздушного движения.

Возможность случайного столкновения с участниками текущего воздушного движения анализируется путем поиска упрежденной точки встречи  $P_{ct} = \{\varphi, \lambda, h\}$ , как точки пересечения соответствующих ЛЗП текущих ВС с помощью функции-эквивалента количества критических негативных

воздействий (рисунок 6)

$$f_{\text{ПО}}^j(\chi^k, T_{\text{АК}}^j) = \begin{cases} 0, & \neg \exists P_{\text{СТ}} \vee h_{\text{АК}} \neq h_{T_{\text{АК}}^j}; \\ \infty, & \exists P_{\text{СТ}} \wedge h_{\text{АК}} = h_{T_{\text{АК}}^j}. \end{cases} \quad (7)$$

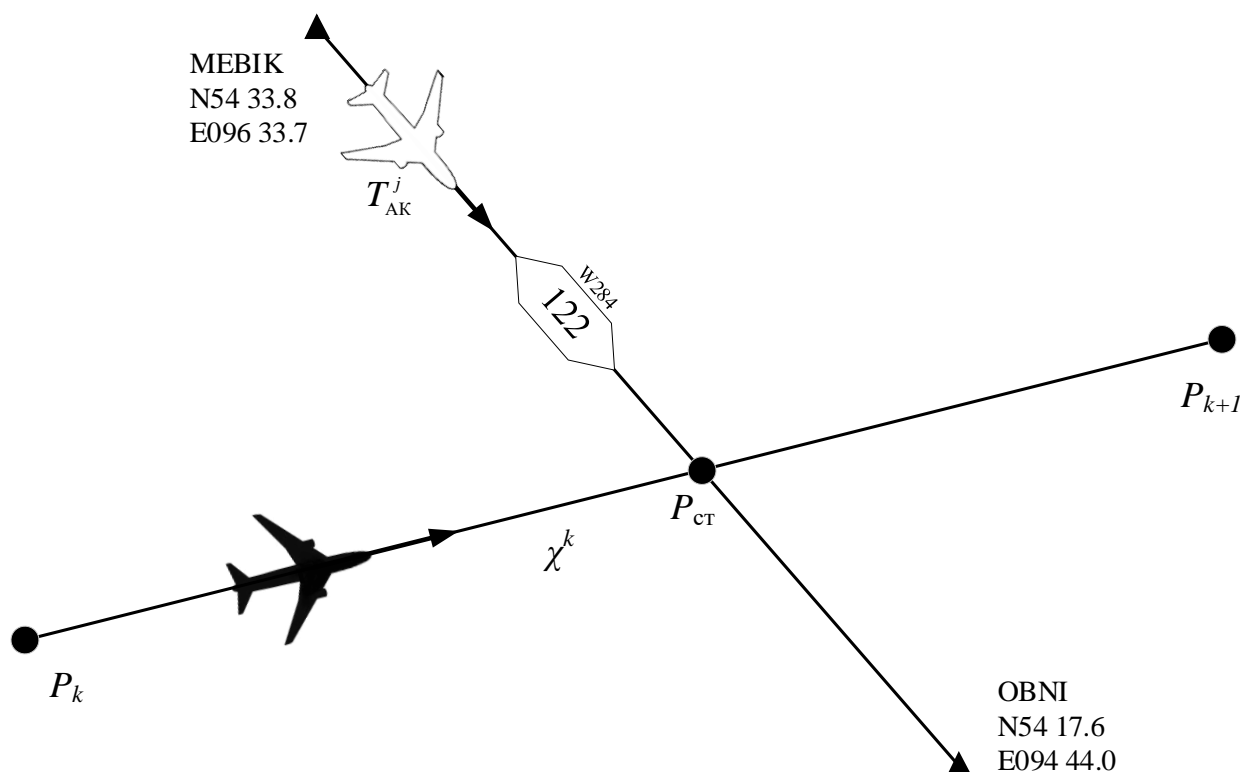


Рисунок 6 – Геометрическая интерпретация оценки возможного столкновения с другими участниками воздушного движения

### Концепция реконфигурации маршрута

Представленные подходы к анализу возможности возникновения критических ситуаций позволяют разработать бортовой алгоритм автоматизированного решения задачи поддержки принятия решений экипажем ВС по изменению ПВГП с целью минимизировать вероятность возникновения критических ситуаций при полете по маршруту.

Реконфигурация ПВГП производится в изменившихся условиях внешней обстановки с учетом технического состояния жизненно-важных агрегатов ВС с целью исключения, либо снижения до приемлемого уровня количества критических воздействий путем обхода и облета опасных зон с

учетом:

- характера рельефа местности и высотных объектов в зоне полета;
- метеоданных и данных техногенной обстановки;
- данных о воздушном трафике;
- ЛТХ ВС и эксплуатационных ограничений;
- ограничений на использование окружающего воздушного пространства.

В процессе реконфигурации ПВГП определяются географические координаты новых ППМ (маршрут), профиль полета, рекомендуемые скорости и времена прохождения соответствующих навигационных точек.

При относительно низкой плотности угроз возможен облет (обход) опасных зон. Если плотность расположения угроз такова, что их обход или облет невозможен, то алгоритм позволяет построить рациональный ПВГП, обеспечивающий минимальное количество критических воздействий от негативных факторов на маршруте.

Функция автоматизированного решения задачи доступна при условии, что потребное время для проведения расчетов не превышает располагаемое время (время до реализации угрозы).

Исходными данными функции автоматизированного решения задачи поддержки принятия решений экипажем ВС по изменению маршрута и высотно-скоростного режима является:

- участок текущего маршрута, требующий реконфигурации, заданный географическими координатами соответствующих навигационных точек  $P_{\text{нач}}(\varphi_{\text{нач}}, \lambda_{\text{нач}})$  и  $P_{\text{кон}}(\varphi_{\text{кон}}, \lambda_{\text{кон}})$  текущего маршрута  $P_M$  ;
- данные текущей траектории  $P_{\text{тр}}$ , содержащие данные о навигационных точках маршрута (далее – НТ)  $P_i = \{\varphi_i, \lambda_i\}$  ,
- параметры профиля полета  $H_i$  расчетные времена  $t_i$  и рекомендуемые скорости прохождения  $V_i$  ;

– параметры системы эшелонирования  $H_s = \{n_i, h_i, \sigma_i\}$ , где  $n_i$  – номер  $i$ -го эшелона,  $h_i$  – определяющая абсолютная высота,  $\sigma_i$  – уровень доступности;

– параметры текущего воздушного трафика

$$T_{AK} = T_{AK}^j \{n_{ид}, n_{борт}, \varphi, \lambda, h, V, \alpha_{курс}\};$$

– матрица высот рельефа и объектового состава  $H_{мтр}^{ij} = \{i, j, h\}$ ;

– параметры разрешенных трасс и аэродромов;

– параметры атмосферы;

– параметры опасных и запретных зон, подлежащих анализу

$$Q_{OЗ} = \{n_{OЗ}, q_{гран} \{\varphi_i, \lambda_i, h_i\}, V_{OЗ}, \alpha_{курс}\};$$

– летно-технические характеристики и эксплуатационные

ограничения ВС  $a_{огр} = \{V_{min}, n_{max}^x, n_{max}^y, \theta_{max}, \gamma_{max}, h_{max}, R_{max}, L_{max}, t_{max}, L_{min}^{ВПП}\}$ ,

содержащие ограничение по скорости, перегрузкам и угловым характеристикам, а также практический потолок, радиус разворота, практическую дальность полета с максимальным грузом, максимальную продолжительность полета и требуемую длину ВПП;

– текущие параметры ВС  $a_{AK} = \{n_{ид}, n_{борт}, n_{нт}, \varphi, \lambda, h, V, \alpha_{курс}, m_{топ}\}$ .

Для упрощения расчетов целесообразно задать расчетную ортодромическую систему координат  $(xyz)$ , в которой точкой начала отсчета

$O(0,0,0)$  является проекция точки начала оптимизируемого участка маршрута

$P_{нач} = (\varphi_{нач}, \lambda_{нач})$  на заданную поверхность (рисунок 7).

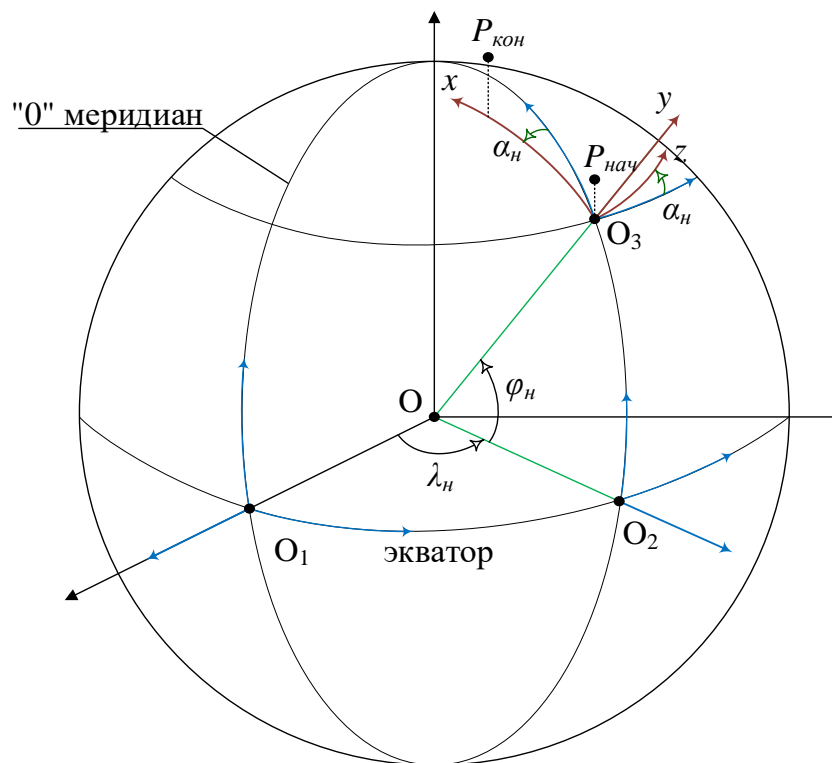


Рисунок 7 – Формирование параметров расчетной системы координат

Ось абсцисс  $Ox$  (мнимый нулевой меридиан) представляет собой вектор, имеющий начало в проекции начальной точки оптимизируемого участка и проходящий через проекцию конечной точки оптимизируемого участка маршрута на заданную поверхность. Отсчет ведется от проекции начальной точки оптимизируемого участка маршрута в положительном направлении. Ось аппликат  $Oz$  (мнимый экватор) имеет начало в проекции начальной точки оптимизируемого маршрута на заданную поверхность и направлена перпендикулярно оси абсцисс в правую сторону. Отсчет ведется от проекции начальной точки оптимизируемого участка маршрута в положительном направлении. Ось ординат  $Oy$  (высота) ортогональна заданной поверхности и дополняет систему координат до правой тройки векторов. Система единичных отрезков определяется динамически исходя из состава учитываемых опасных зон. Геометрическая интерпретация расчетной дискретной сетки приведена на рисунке 8.

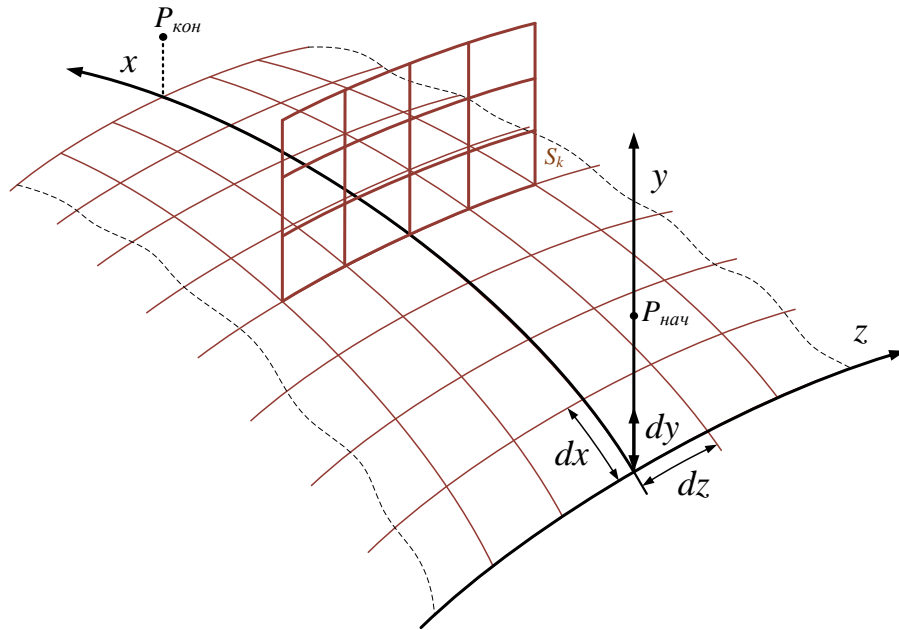


Рисунок 8 – Геометрическое представление расчетной дискретной сетки

При переходе от геоцентрической системы координат (далее – ГСК) к расчетной ортодромической системе координат (далее – РОСК) используется базисный трехгранник  $O_1x_1y_1z_1$ , построенный на базисных векторах ГСК, где точка  $O_1 = (\varphi_1, \lambda_1, h_1)$  является началом отсчета в ГСК:

- $x_1$  вектор, проходящий по нулевому меридиану, выходящий из точки  $O_1$  и направленный на север, заданной длины;
- $y_1$  вектор, проходящий по земному экватору, выходящий из точки  $O_1$  и направленный на восток, заданной длины;
- $z_1$  вектор, выходящий из точки  $O_1$ , ортогональный поверхности эквивалентной сферы и дополняющий систему координат до правой тройки векторов, заданной длины.

Преобразование базисного трехгранника можно разбить на несколько отдельных шагов:

- 1) поворот на угол  $\lambda_{нач}$  вокруг оси, проходящей от центра Земли к северному полюсу:

$$(\varphi_2 \quad h_2 \quad \lambda_2 \quad 1) = (\varphi_{\text{ГСК}} \quad h_{\text{ГСК}} \quad \lambda_{\text{ГСК}} \quad 1) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_{\text{нач}} & 1 \end{pmatrix}; \quad (8)$$

2) поворот на угол  $\varphi_{\text{нач}}$  вокруг оси, проходящей от центра Земли к точке  $O_1$ :

$$(\varphi_3 \quad h_3 \quad \lambda_3 \quad 1) = (\varphi_2 \quad h_2 \quad \lambda_2 \quad 1) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\varphi_{\text{нач}} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (9)$$

3) поворот на угол  $\alpha_{\text{нач}}$  вокруг оси, проходящей от центра земли к точке  $P_{\text{нач}}$ :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{\text{РОСК}} \\ h_{\text{РОСК}} \\ \lambda_{\text{РОСК}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{\text{нач}} & 0 & \sin \alpha_{\text{нач}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_{\text{нач}} & 0 & \cos \alpha_{\text{нач}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_3 \\ h_3 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

4) Пересчет из геодезической СК в прямоугольную:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_g & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & R_g \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{\text{РОСК}} \\ h_{\text{РОСК}} \\ \lambda_{\text{РОСК}} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{\text{нач}}$  – азимут главного направления в радианах,  $R_g$  – радиус эквивалентной сферы в метрах.

Задача реконфигурации ПВГП ВС в поле угроз решается как задача дискретного динамического программирования, в которой требуется минимизировать аддитивный критериальный функционал

$$J^{\Sigma}(\chi, T_{\text{AK}}, Q_{\text{OЗ}}) = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{i=1}^M f_{\text{OЗ}}^i(\chi^k, Q_{\text{OЗ}}^i) + \sum_{j=1}^N f_{\text{ПО}}^j(\chi^k, T_{\text{AK}}^j) \right], \quad (12)$$

характеризующий математическое ожидание суммарного числа критических воздействий, приходящихся на ВС на рассматриваемом участке маршрута от всех возможных угроз с учетом штрафных функций за нарушение ограничений

$$\chi^* = \arg \min_{\chi^k \in \chi} \sum_{k=1}^K J_k(\chi^k, T_{\text{AK}}, Q_{\text{OЗ}}), \quad (13)$$

где:

–  $f_{\text{OЗ}}^i(\chi^k, Q_{\text{OЗ}}^i)$  – функция, характеризующая уровень критических негативных воздействий, приходящихся на ВС в  $i$ -й опасной зоне на  $k$ -м участке маршрута;

–  $f_{\text{ПО}}^j(\chi^k, T_{\text{AK}}^j)$  функция штрафа за опасное сближение, угрожающее столкновением с  $j$ -м ВС на  $k$ -м участке маршрута;

–  $\chi = \{\chi^k\}$  – параметры новой траектории;

–  $\chi^k = \{P_k, P_{k+1}, h_k, h_{k+1}, V_k, m_k^T, \Delta t_k\}$  параметры  $k$ -го расчетного участка;

–  $P_k = \{\varphi_k, \lambda_k\} \in S_k, k = \overline{1, K-1}$  – координаты  $k$ -й расчетной НТ, причем  $P_0 = P_{\text{нач}}, P_K = P_{\text{кон}}$ ;

–  $Q_{\text{OЗ}} = \{Q_{\text{OЗ}}^i\}$  – параметры опасных и запретных зон,  $T_{\text{AK}} = \{T_{\text{AK}}^j\}$  – данные текущего воздушного трафика.

Управляемое движение ВС рассматривается как перемещение по узлам РОСК, сгруппированных по множествам  $S_k$ , удовлетворяющих уравнениям связи:

$$x^{k-1} = x^k - \Delta x_k, \quad (14)$$

$$y^{k-1} = y^k - \Delta y_k, \quad (15)$$

$$z^{k-1} = z^k - \Delta z_k, \quad (16)$$

где  $S_k, k = \overline{1, K-1}$  – множество возможных состояний, соответствующих пространственному сечению (рисунок 9) на момент времени  $t_k$ , а  $x, y, z$  – координаты в геоцентрической декартовой СК. Количество расчетных интервалов  $K$  определяется исходя из текущей скорости полета, качества сложных условий и наличия особых случаев аэронавигации.

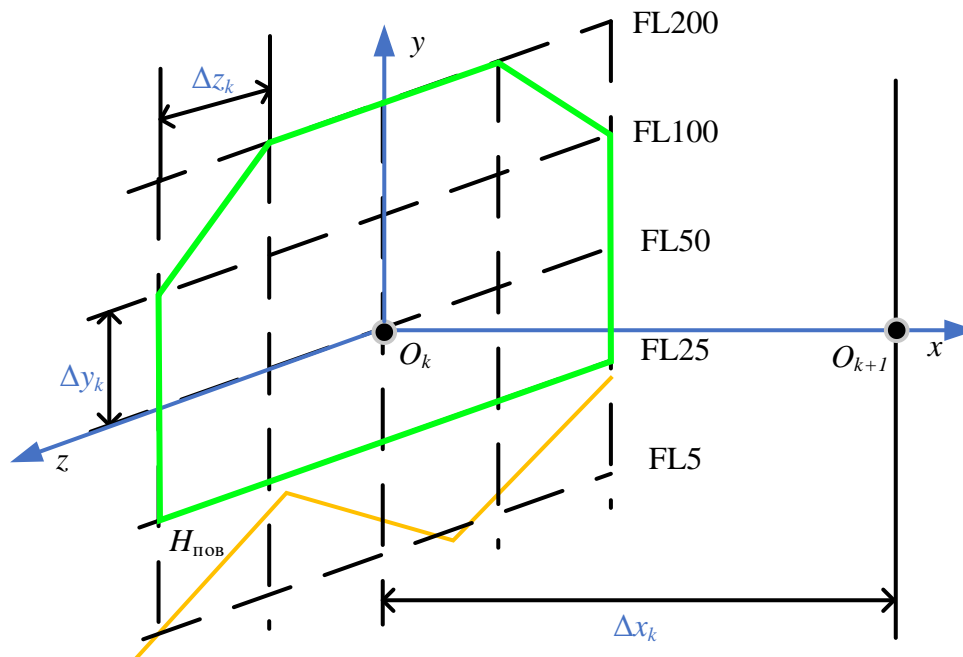


Рисунок 9 – Схема пространственного сечения на момент  $t_k$

Поиск оптимальной траектории по критерию  $\min_{\chi} J^{\Sigma}(\chi, T_{AK}, Q_{O3})$  начинается в обратном порядке начиная с определения крайнего сечения  $S_{K-1}$ .

Каждый узел анализируется на удовлетворение системе исходных данных. Далее определяется возможность перелета от данного узла  $P_k^i \in S_k$  к следующему  $P_{k+1}^j \in S_{k+1}$  с помощью анализа расчетной ЛЗП с целью проверки эксплуатационных ограничений и достатка топлива с учетом потребного радиуса виража  $R_{\min}$

$$R_{\min} = \begin{cases} \frac{V^2}{g \sqrt{n_{y \text{ эксп}}^2 - 1}}, & \text{при } n_{y \text{ эксп}} \neq 0; \\ \frac{V^2}{g \sqrt{n_{y \text{ max}}^2 - 1}}, & \text{при } n_{y \text{ эксп}} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом общий вид ПВГП представляет собой направленный граф  $G = \langle \chi, \varepsilon \rangle$ , где  $\chi$  – множество состояний, соответствующих определенным ЛЗП,  $\varepsilon$  – множество переходов.

Состояние  $\chi^k = \{P_k, P_{k+1}, h_k, h_{k+1}, V_k, m_k^T, \Delta t_k\}$  характеризуется географическими координатами соответствующего ППМ, высотой, скоростью, остаточным количеством топлива и ожидаемым временем прохождения. Переход  $\varepsilon_k = \{P_k, P_{k+1}, J_k\}$  содержит в себе информацию о стоимости (количества негативных влияний) преодоления участка маршрута  $\chi^k$ , в виде функции потенциальной опасности, отражающей среднее число критических негативных воздействий, приходящихся на этот участок маршрута:

$$J^k(\chi^k, T_{AK}, Q_{O3}) = \sum_{i=1}^M f_{O3}^i(\chi^k, Q_{O3}^i) + \sum_{j=1}^N f_{PO}^j(\chi^k, T_{AK}^j). \quad (18)$$

Крайним шагом построения траектории обхода/облета является расчет оптимального ПВГП на участке  $\chi^0 = \{P_{нач}, P_1, h_{нач}, h_1, V_{нач}, m_{нач}^T, \Delta t_0\}$  и выбора оптимальной траектории обхода/облета на заданном участке  $G^* = \langle \chi^*, \varepsilon^* \rangle$ .

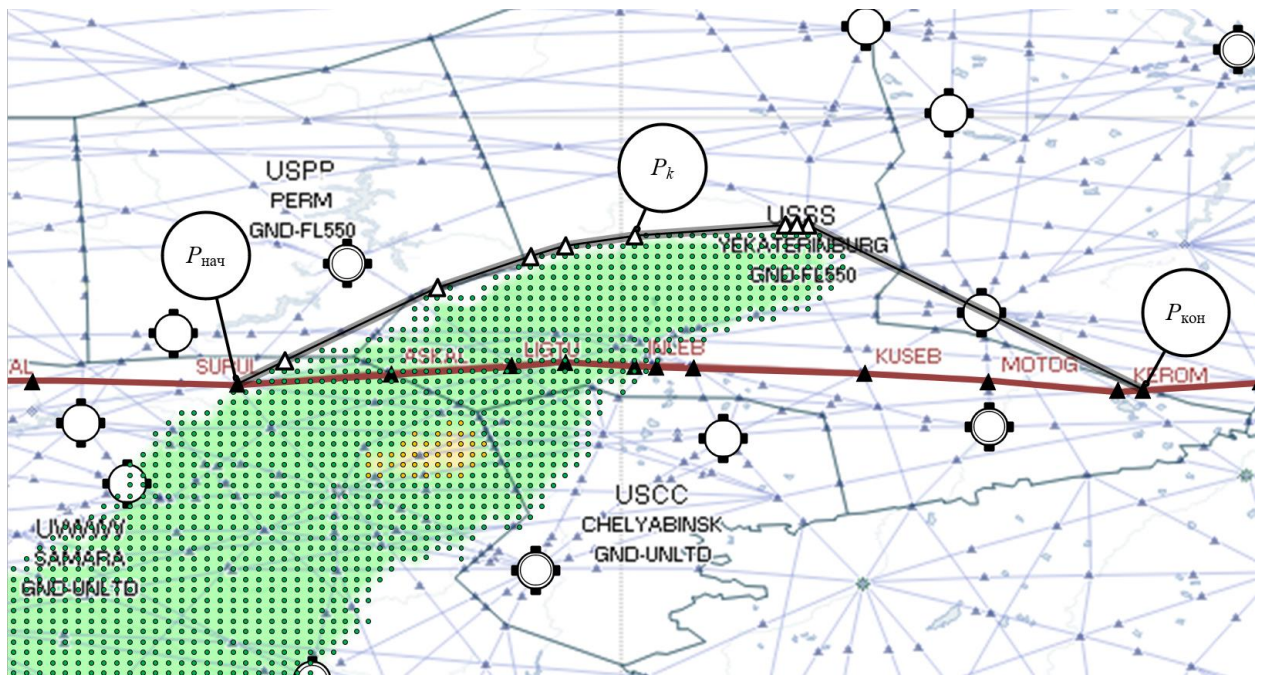


Рисунок 10 – Графическая интерпретация результата работы алгоритма реконфигурации ПВГП с учетом анализа зон турбулентности

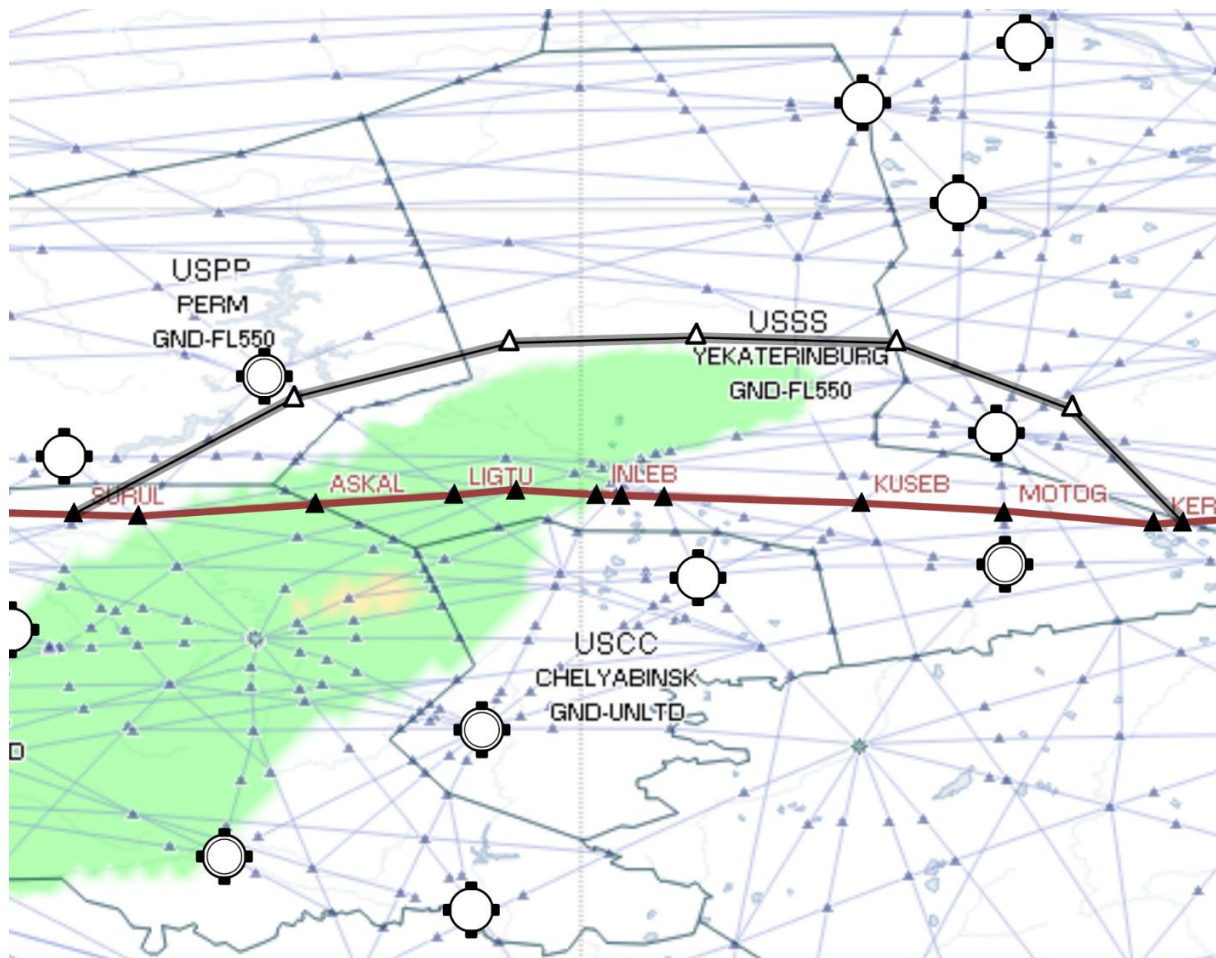


Рисунок 11 – Отображение оптимизированного участка маршрута

Итоговый вариант (рисунки 10-11) реконфигурации ПВГП передается с учетом протоколов информационного взаимодействия в ФПО НО и выводится экипажу на МФЦИ.

Результат работы алгоритма реконфигурации ПВГП носит информативный характер и может быть отклонен экипажем. В связи с чем алгоритм формирует сразу несколько вариантов корректировки, отсортированных по правилу «от лучшего к худшему». Так же допускается отказ от всех вариантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология интеллектуальной поддержки экипажа в части решения задачи реконфигурации пространственно-временного графика полета воздушного судна по маршруту в зоне действия угроз и сложных условиях

позволит качественно повысить уровень самолетовождения и снизить нагрузку на экипаж при пилотировании ВС.

Развитие данной технологии позволит снизить вероятность возникновения критических ситуаций и принятия ошибочных решений экипажем, тем самым сократить количество авиакатастроф, а также повысить эффективность авиационных комплексов при решении различных задач.

Технология интеллектуальной поддержки экипажа формирует научно-технологический задел для дальнейшего развития отечественной авиации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aviation Safety Network: офиц. сайт. – URL: <https://aviation-safety.net/> (дата обращения: 24.04.2024).

2. Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации: постановление Правительства Рос. Федерации от 11 марта 2010 г. № 138 (с изменениями и дополнениями) // Российская Бизнес-газета. – 2010. – № 12(745). – URL: <https://rg.ru/documents/2010/04/13/vozdushnoe-prostr-dok.html> (дата обращения: 24.04.2024).

3. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации»: приказ М-ва транспорта Рос. Федерации от 31 июля 2009 г. № 128 // Российская газета. – 2009. – 09 сент. – Федеральный выпуск № 169(4993). – URL: <https://rg.ru/documents/2009/09/10/avia-pravila-dok.html> (дата обращения: 24.04.2024).

4. ОСТ 1 02514-84. Модель турбулентности атмосферы. Характеристики: утвержден и введен в действие Распоряжением Министерства от 20 сент. 1984 г. № 298-65: дата введения 1986-01-01. – М., 1984. – 13 С.

5. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов / В.И. Тихонов. – М.: Наука, 1970. – 392 С.

6. Семаков С.Л. Выбросы случайных процессов: приложения в авиации / С.Л. Семаков. – М.: Наука, 2005. – 200 С.
7. Казаков И.Е., Мальчиков С.В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И.К. Казаков, С.В. Мальчиков – М.: Наука, 1983. – 384 С.
8. Крассовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Крассовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985. – 476 С.
9. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления: пер. с англ. / Ричард Беллман, Роберт Калаба; пер. Е.Я. Ройтенберг; под ред. Б.С. Разумихин. – Москва: Наука, 1969. – 118 С.
10. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федунов – М.: «Физматлит», 2000. – 352 С.
11. Михайлин Д.А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – № 20(4). – С. 18-24.
12. ARINC708A. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability. ARINC characteristic 708A-3 / ARINC Industry Activities (IA). – 1999. – 15 nov. – 120 P.