

УДК 351.814.32

DOI 10.51955/2312-1327_2025_3_87

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА. ЧАСТЬ 2

Александр Юрьевич Княжеский,
orcid.org/0000-0001-7901-2861,

кандидат технических наук

АО «НПО «Обуховский завод»,

проспект Обуховской обороны, д. 120

Санкт-Петербург, 192012, Россия

knjagskij@mail.ru

Сергей Валентинович Баушев,
orcid.org/0000-0003-3772-7636,

доктор военных наук, профессор

АО «НПО «Обуховский завод»,

проспект Обуховской обороны, д. 120

Санкт-Петербург, 192012, Россия

s.baushev@goz.ru

Аннотация. Настоящая статья является второй частью обзора систем планирования использования воздушного пространства. В первой части был проведен сравнительный анализ известных моделей воздушной обстановки: сетевых, вероятностных, динамики загрузки, экспертных, развития воздушной обстановки, потенциалов, энтропийных. Во второй части проведен сравнительный анализ существующих подходов к планированию использования воздушного пространства: синтеза маршрутов движения, управления загрузкой органов ОрВД, оптимизации множества планов полётов, разрешения единичных конфликтов планов полётов, планирования потоков вылетов/прилетов. Выявлены преимущества и недостатки проанализированных подходов, предложена их классификация, исходя из физического смысла и полноты группы.

Ключевые слова: планирование использования воздушного пространства, планирование полётов, безопасность воздушного движения, планы полётов, организация воздушного движения, авиационные конфликты, диспетчерское обслуживание.

CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF AIRSPACE PLANNING SYSTEMS. PART 2

Alexander Yu. Knyazhsky,
orcid.org/0000-0001-7901-2861,

Candidate of Technical Sciences

JSC "RPA "OBUKHOVSKY PLANT"

Obukhovskaya Oborony Avenue, 120

St. Petersburg, 192012, Russia

knjagskij@mail.ru

Sergey V. Baushev,
orcid.org/0000-0003-3772-7636,
Doctor of Military Sciences, Professor
JSC "RPA "OBUKHOVSKY PLANT"
Obukhovskaya Oborony Avenue, 120
St. Petersburg, 192012, Russia

Abstract. This article is the second part of the review of airspace planning systems. The first part provided a comparative analysis of known air situation models: network, probabilistic, load dynamics, expert, air situation development, potentials, entropy. The second part provides a comparative analysis of existing approaches to airspace planning: route synthesis, ATM load management, flight plans optimization, single air conflict resolution, departure/arrival flow planning. The advantages and disadvantages of the analyzed approaches are identified, their classification is proposed based on the physical meaning and completeness of the group.

Keywords: airspace planning, flight planning, air traffic safety, flight plans, air traffic management, air conflicts, air traffic control.

Introduction (Введение)

Планирование полётов, осуществляемое безопасными, экономичными и эффективными способами с учетом интересов всех сторон, является одной из основных задач организации воздушного движения (ОпВД) [Федеральные..., 2011]. Для оценки современного состояния и перспектив развития систем планирования полётов в первой части статьи [Княжский и др., 2025] проведен обзор существующих моделей воздушного движения: сетевых, вероятностных, динамики загрузки, экспертных, развития воздушной обстановки, потенциалов, энтропийных. Выявлены преимущества и недостатки данных моделей. Целью настоящей статьи, продолжающей работу [Княжский и др., 2025], является обзор существующих подходов к планированию полётов, их классификация, оценка преимуществ и недостатков, с целью оценки современного состояния и перспектив развития систем планирования использования воздушного пространства.

В соответствии с [Табель сообщений ..., 2013] план полёта (ПП) содержит следующую информацию: опознавательный индекс ВС, аэродром и время вылета, маршрут, аэродром назначения и расчетное время прилёта, перечень запасных аэродромов, крейсерскую скорость и крейсерский эшелон полёта, прочие данные. Маршрут полёта представляет собой установленную последовательность контрольных точек, заданных географическими координатами, через которые должно пролететь ВС.

В [Глобальный аэронавигационный..., 2016] поставлена цель формирования ПП в виде 4D-траекторий, представляющих последовательность 4D-точек. Каждая 4D-точка является трехмерной координатой с сопоставленным временем ее прохождения. 4D-траектория содержит более точную информации о полёте, чем традиционный ПП, и позволяет планировать более гибкие сценарии полёта за счет изменения времен прохождения контрольных точек, а также, при необходимости, добавления новых. Но поскольку корректность определения «4D-траектория» неоднозначна с точки зрения математики, далее в статье вместо него будет использоваться понятие ПП, подразумевая

последовательность трехмерных координат с сопоставленными им временами прохождения, без учета остальных содержащихся в нем данных. Под профилем ПП будет пониматься маршрут с сопоставленными контрольным точкам высотами (трехмерная траектория).

В настоящее время, в связи с обострением международной обстановки, возрастанием рисков террористических атак, а также появлением новых технологий, способных оказывать негативное воздействие на системы передачи и обработки информации, возрастает необходимость планирования полётов наиболее безопасными способами, учитывая различные сценарии полётов, при возникновении нештатных ситуаций.

При нештатных ухудшениях воздушной обстановки становится неприемлемым как минимум один из следующих показателей: директивный срок выполнения заявки на полёт, время ее обслуживания, стоимость обслуживания заявки, характеризуемая функцией от вероятности опасного сближения ВС, расхода топлива и показателей сложности управления. Разрешить данную проблему возможно за счет совершенствования подходов к планированию использования воздушного пространства (ПИВП) и управлению воздушным движением.

В настоящей статье проведен анализ научных публикаций, описывающих современные подходы к планированию использования воздушного пространства. Основное внимание уделялось отечественным и зарубежным научным статьям и патентам на изобретения, начиная с 2017 г. На основе анализа источников, исходя из физического смысла и полноты группы, предложена следующая классификация подходов: синтеза маршрутов движения, управления загрузкой органов ОрВД, оптимизации множества ПП, разрешения единичных конфликтов ПП, оптимизации потока вылетов/прилетов. В настоящее время в открытых источниках не приведен алгоритм планирования использования воздушного пространства, позволяющий в автоматическом режиме вычислить оптимальные ПП ВС по критерию максимальной пропускной способности воздушного пространства с ограничениями на расход топлива и др. показатели качества.

Materials and methods (Материалы и методы)

Материалами исследования являются научные публикации в журналах, аккредитованных ВАК по научной специальности «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники», патенты, программы для ЭВМ и используемые системы АС ОрВД, в которых описываются и исследуются способы и алгоритмы планирования полётов, а также научные публикации в зарубежных журналах и других рецензируемых изданиях. Основные материалы изложены в работах: Рудельсона Л.Е., Советова Б.Я., Чеха В.А., Кулиды Е.Л., Barnhart C., Chaimatanan S., Wilson A.G., а также в описании продукции организаций, занимающихся разработкой систем планирования использования воздушного пространства: АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», ООО «Фирма «НИТА», ПАО «НПО «Алмаз» – ТОП «ЛЭМЗ», АО «АЗИМУТ», АО «НТЦ Промтехээро», ООО

«МОНИТОР СОФТ», General Dynamics Mission Systems, SITA, Lufthansa Systems, Jeppesen и Airpas Aviation.

Методы исследования: системный анализ.

Discussion (Дискуссия)

Для осуществления планирования полётов необходима аэронавигационная информация, включающая данные о расположении аэропортов, воздушных трасс, запретных зон, а также характеристиках ВС, прогнозируемой метеорологической обстановке, состоянии воздушного пространства и пропускной способности аэропортов и других органов ОрВД. При планировании полётов необходимо выявлять наиболее перегруженные элементы системы ОрВД и осуществлять их разгрузку. Элементами системы ОрВД являются: сектора обслуживания воздушного движения (ОВД), точки и участки воздушных трасс, аэропорты и др. Программное обеспечение планирования полётов относится к ключевым элементам системы ОрВД [Габайдулин и др., 2010].

На рис. 1 приведена общая схема процесса ОрВД.

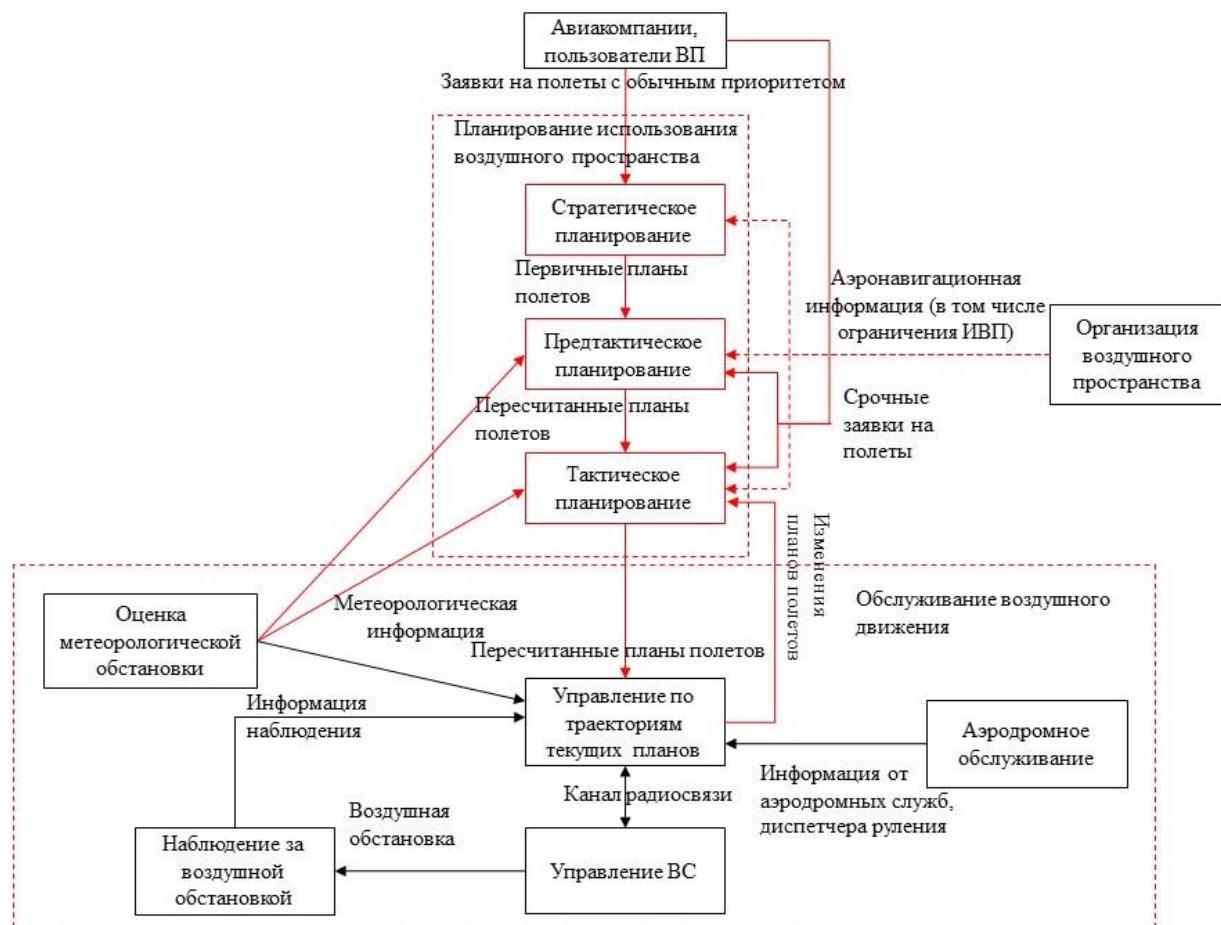


Рисунок 1 – Общая схема процесса организации воздушного движения

На рис. 2 с учетом рекомендаций, приведенных в [Баушев, 2024], предложена классификация современных подходов к решению задач

планирования полётов. Приведенные задачи, за исключением разрешения единичных конфликтов ПП, решаются на всех трех этапах планирования использования воздушного пространства: стратегическом, предтактическом и тактическом планировании. Разрешение единичных конфликтов ПП осуществляется только на этапах предтактического и тактического планирования.

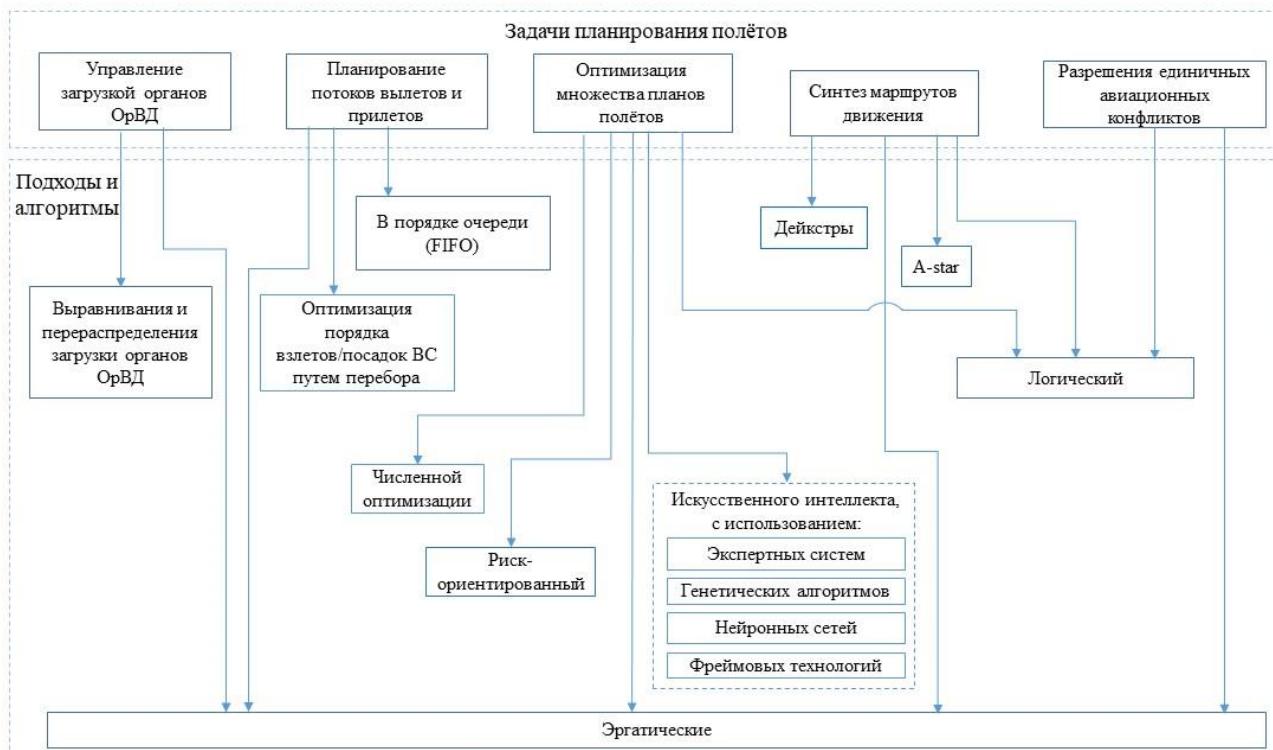


Рисунок 2 – Современные подходы к решению задачи планирования полётов

При планировании полётов необходимо решать следующие задачи: синтеза маршрутов движения, управления загрузкой органов ОрВД, оптимизации множества ПП, планирования потоков вылетов и прилетов, разрешения единичных конфликтов ПП. В большинстве случаев маршрут прокладывается через заданные маршрутные точки в географической системе координат, при необходимости допускается введение дополнительных маршрутных точек. Управление загрузкой органов ОрВД – это процесс перераспределения потоков ВС через органы ОрВД таким образом, чтобы исключить превышение их пропускной способности. Планирование потоков вылетов и прилетов – это процесс формирования расписания вылетов и прилетов ВС в аэропортах, на основе исходных заявок на полёты, аeronавигационной информации и прогнозируемой воздушной и метеорологической обстановки. Синтез маршрутов движения ВС – это процесс вычисления оптимального по заданному критерию маршрута движения ВС, с учетом введенных правил и ограничений. Разрешение единичных конфликтов ПП – это процесс предотвращения опасного сближения ВС наиболее выгодным способом из допустимых, в соответствии с правилами воздушного движения.

1. Синтез маршрутов движения ВС

Известно четыре подхода к решению задачи синтеза маршрутов движения ВС: логический; ручной (эргатический)¹; два подхода, базирующихся на выполнении алгоритмов Дейкстры и A-star. Логический алгоритм определяет маршрут по набору правил, сводящихся к последовательности логических операций и вычислений [Методика..., 2008]. Несмотря на то, что в алгоритмах Дейкстры и A-star тоже осуществляются логические операции, в данной классификации выделены в отдельную категорию алгоритмы выбора маршрута из фиксированного множества по заданным правилам, в которых вместо маршрутных графов за основу берется уже известное множество готовых маршрутов. При планировании маршрута полёта ВС, после поступления заявки на полёт, из данного множества выбирается кратчайший свободный маршрут, не проходящий через зоны ограничений воздушного пространства [Демин, 2006; Нечеткий..., 2022]. Также возможен выбор маршрута по другим критериям.

Для составления множества маршрутов с «чистого листа» в порядке выбранных приоритетов потоков ВС с использованием аeronавигационных точек формируются схемы движения ВС. В начале маршрута для наиболее интенсивного потока ВС прокладывается через существующие аeronавигационные точки как можно ближе к соответствующей ортодромии без учета других потоков. При необходимости вводятся дополнительные аeronавигационные точки. Маршрут для каждого следующего потока ВС, являющегося наиболее интенсивным из оставшихся, прокладывается аналогичным образом, но с наименьшим числом сближений/пересечений с уже сформированными маршрутами. При отсутствии достаточного воздушного пространства для организации независимого маршрута очередной маршрут прокладывается по уже проложенным.

Исходные данные: координаты контрольных аeronавигационных точек; множество точек стартов и посадок, соответствующих потокам ВС; значения планируемых интенсивностей потоков; максимальная пропускная способность контрольной аeronавигационной точки; минимально допустимое расстояние между ВС по вертикали и горизонтали.

Выходные данные: множество маршрутов.

Алгоритм формирования маршрута по свободным точкам представляет собой модернизированный алгоритм Дейкстры² [Dijkstra, 1959], в котором при определении очередного кратчайшего маршрута рассматриваются только те точки, пропускная способность которых больше суммы интенсивностей проходящих через нее потоков и рассматриваемого потока. Схема алгоритма

¹ Ручной (эргатический) подход заключается в использовании систем, в которых человек-оператор является неотъемлемой частью системы управления. Такие системы объединяют преимущества человеческого интеллекта, способности к принятию решений в нестандартных ситуациях, а также возможности машин по обработке больших объёмов данных и выполнению рутинных операций.

² Алгоритм Дейкстры предназначен для нахождения кратчайшего пути от одной из вершин взвешенного ориентированного графа до всех остальных. Сначала выбирается вершина, от которой будут отсчитываться пути. Затем алгоритм поочерёдно ищет самые короткие пути от выбранной вершины до всех остальных. Просмотренные вершины отмечаются посещёнными с изменением метки при нахождении более короткого пути до них.

приведена на рис. 3.

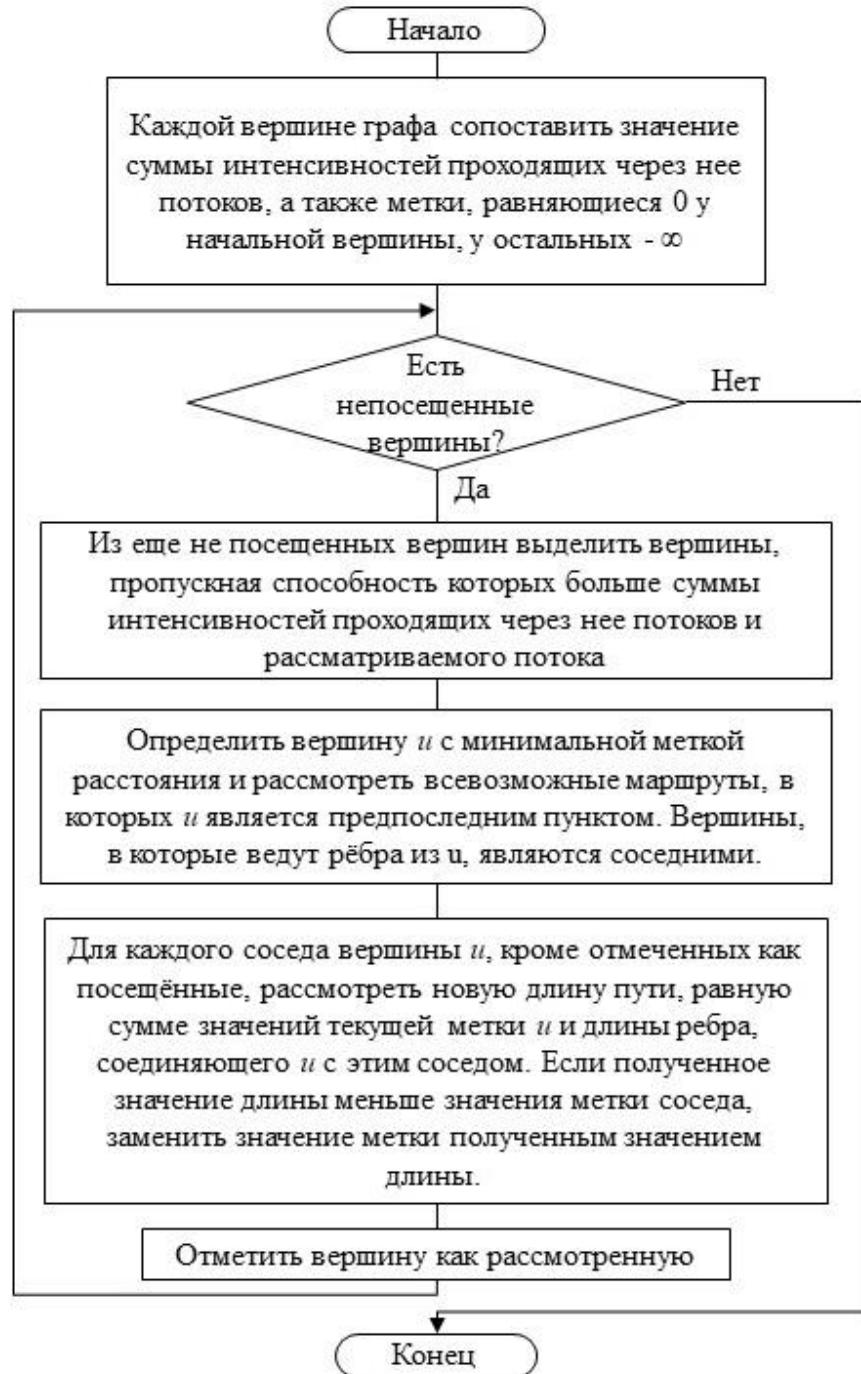


Рисунок 3 – Схема алгоритма формирования маршрута по свободным точкам

После поступления заявок на полёты по определенным маршрутам формируются ПП $\text{Tr}_{4D} = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, $P_i = (x_i, y_i, z_i, t_i)$, где i – номер контрольной точки, x_i – широта; y_i – долгота; z_i – высота; t_i – время.

Каждой контрольной точке маршрута сопоставляют время ее прохождения. ПП зависит от типа ВС и планируемого состояния воздушной обстановки.

В [Будков, 2021] проведен анализ проблем при выполнении маршрутов в гражданской авиации, определены минимально необходимые требования для системы поддержки принятия решения и предложена методика поиска

оптимального маршрута ВС, с использованием алгоритма A-star, состоящая из следующих шагов [Dechter et al., 1985]:

1. Ввод исходных данных и загрузка параметров воздушного пространства;
2. Расчет параметров множества существующих маршрутов на основе алгоритма A-star³;
3. Определение нескольких вариантов оптимальных маршрутов по критериям: минимума расхода топлива, минимальной задержки прибытия, минимума времени в пути;
4. Передача информации об определенных маршрутах потребителям.

При планировании полётов ВС для обхода запретных зон возможно использовать способ формирования маршрута обхода летательным аппаратом зон воздушного пространства с опасными метеорологическими условиями, состоящий из следующих обобщенных шагов [Патент № 2798628..., 2023]:

1. Определение запретных зон;
2. Объединение близкорасположенных запретных зон, включая области между ними, в случае невозможности построения достаточно прямого маршрута обхода;
3. Дискретизация воздушного пространства;
4. Определение дискретов воздушного пространства, включающих запретные зоны (полностью или частично);
5. Формирование кратчайшего маршрута в обход запретных зон, проходящего по границам выпуклого многоугольника, образованного дискретами пространства, не затрагивающими запретных зон.

В [Жук и др., 2022] предложен алгоритм планирования маршрута ВС. На первом этапе выполняется расчет оптимального по критерию минимального расхода топлива замкнутого маршрута ВС. Эффективность выбора маршрута ВС оценивается по отношению к известному алгоритму Кернигана-Лина [Kernighan, 1970]. Общая схема одной итерации алгоритма Кернигана-Лина включает следующие шаги:

1. Формирование множества пар вершин для перестановки;
2. Построение новых вариантов разбиения графа;
3. Выбор наилучшего варианта разбиения графа;
4. Проверка использования всех вершин;
5. Выбор наилучшего варианта разбиения графа.

Общее количество выполняемых итераций фиксируется заранее и является параметром алгоритма.

³ Алгоритм A-star предназначен для поиска маршрута с наименьшей стоимостью между двумя вершинами на взвешенном ориентированном графе. Он подобен алгоритму Дейкстры, но в отличие от него, сначала рассматривает узлы с наименьшим приоритетом, а не те, которые находятся на наименьшем расстоянии. Порядок обхода вершин определяется эвристической функцией (расстояние + стоимость). Пошагово просматриваются все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдется минимальный. Просматриваются сначала те маршруты, которые «кажутся» ведущими к цели. При выборе вершины он учитывает, помимо прочего, весь пройденный до неё путь. На каждом этапе алгоритм оперирует с множеством путей из начальной точки до всех ещё не раскрытых вершин графа – множеством частных решений, – которые размещаются в очереди с приоритетом. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока значение целевой вершины не окажется меньшим, чем любое значение в очереди, либо пока всё дерево не будет просмотрено.

На втором этапе с помощью предложенного в [Жук и др., 2022] алгоритма выполняется корректировка найденного маршрута ВС с учетом имеющегося запаса топлива, т. е. решается вопрос о возвращении ВС или после пополнения запаса топлива в промежуточном пункте продолжения облета оставшихся участков. На рис. 4 приведен алгоритм решения рассматриваемой задачи.



Рисунок 4 – Алгоритм выбора маршрута ВС

Алгоритмы Дейкстры и A-star возможно использовать как при расчете маршрута между аэропортами, так и при его частичном изменении, например, для обхода опасных метеорологических явлений и запретных зон.

2. Управление загрузкой органов организации воздушного движения

Под загрузкой органа ОрВД $\lambda_{загр}$ (ВС/час) понимается отношение текущей интенсивности потока ВС $\lambda(t)$ (ВС/час), проходящего через орган ОрВД в анализируемый период времени, к его пропускной способности λ_{max} (ВС/час)

$$, \quad (1)$$

где $N_{BC}(t)$ – число ВС в момент времени t в области воздушного пространства,

обслуживаемой органом ОрВД; Δt – длина анализируемого периода времени перед t .

Пропускная способность органа ОрВД – это способность обслуживать в единицу времени определённое количество ВС с соблюдением установленных требований к безопасности полётов и других установленных ограничений.

Задача управления загрузкой органов ОрВД решается в ручном режиме, либо автоматическим выравниванием и перераспределением загрузки органов ОрВД. Необходимо, чтобы при планировании полётов не было превышения пропускной способности органов ОрВД, нормативы которой определяются в соответствии с Приказом Росавиации⁴. В работе [Гимишян, 2024] предложено при сравнении загруженности диспетчеров региональных центров на этапе предтактического планирования полётов учитывать показатели уровня автоматизации систем планирования полётов, выделяя на более автоматизированные сектора воздушного пространства большую максимально-допустимую загрузку.

Для оценки пропускной способности зоны ответственности (сектора) диспетчерского пункта «Круг» возможно применять методику, основанную на комплексном анализе процессов ОВД, таких как функционирование диспетчерского пункта и динамики развития воздушной обстановки [Шейко, 2023]. Она позволяет определять допустимые значения плотности воздушного движения с учетом интенсивности. Для определения этих показателей используется информация о степени автоматизации эксплуатируемой системы ОрВД с учетом некоторых технологических особенностей, структурных особенностях диспетчерской зоны и предполагаемой загруженности диспетчерского персонала.

Методика позволяет рассматривать и аргументировать возможность реализации «обратной» задачи, которая будет заключаться в определении интегрального коэффициента загруженности диспетчера, соответствующего определённым значениям плотности и интенсивности воздушного движения с учетом влияния возможных организационно-технологических факторов.

В [Лошаков и др., 2023] предложено повышать пропускную способность аэропорта за счет прогнозирования скачков загрузки в часы пик, используя моделирование и анализ динамики других показателей качества работы аэропорта. В [Олексин, 2024] обоснована необходимость создания системы показателей сложности обслуживания воздушного движения, включающей: изменение условий выполнения рейсов, интенсивность воздушного движения, сложность организации воздушного пространства, частоту возникновения авиационных конфликтов, уровень поддержки принятия решений диспетчера, состав, форму и качество представления диспетчеру информации о воздушной обстановке. При управлении загрузкой органов ОрВД на этапе планирования необходимо учитывать прогнозируемые показатели этих факторов. Сформированы основные требования к формированию базы исходных данных и

⁴ Приказ Росавиации от 07.11.2012 г. №757 «Об утверждении Методики определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) обслуживания воздушного движения».

представлены результаты корреляционного анализа параметров, оказывающих воздействие на загрузку диспетчера. По критерию Кеттелла⁵ и величине факторных нагрузок определены основные компоненты, являющиеся основой формирования соответствующих показателей сложности.

В [Buffer scheduling..., 2024; Katsigiannis et al., 2023] предложено использовать буферное планирование для обеспечения баланса между производительностью расписания, пассажирскими рейсами и необходимыми ограничениями. Буферное планирование – это техника планирования с выделением свободных от задач промежутков времени. Такие промежутки позволяют сохранить функционирование системы в случае возникновения непредвиденных обстоятельств. Представлено решение задачи распределения мест в аэропортах с учетом предпочтений авиакомпаний и приоритетов рейсов. Также известны способы работы с системой обработки электронных ПП [Patent EP 2381432 A1..., 2011; Patent EP 2561500 B1..., 2020], общая суть которых заключается в получении ПП от множества пользователей, определении конфликтов между ПП ВС и выдаче данных о конфликтах потребителям. Данные способы реализуются в ручном режиме через оператора.

3. Разрешение единичных конфликтов планов полётов

Единичные конфликты ПП могут разрешаться вручную либо по логическому алгоритму. В первом случае ПП корректируется только на основе инструкций и личного опыта. Во втором – автоматически сравниваются различные варианты маневров деконфликтации ВС и выбирается наилучший.

Конфликт ПП – это ситуация, когда движение ВС по ПП приводит к нарушению норм вертикального или горизонтального эшелонирования. Показатель конфликтности ПП в заданной области воздушного пространства определяют по формуле [Kuenz, 2015]:

$$k = \frac{N}{\sum_{i=1}^M T_i}, \quad (2)$$

где N – общее число конфликтов между рассматриваемыми ПП за анализируемый период времени $T_{\text{ан}}$; M – число рассматриваемых ПП; T_i – плановое время полёта ВС по i -му ПП.

Алгоритмы минимизации числа конфликтов между ПП описаны в [Казаков и др., 2016; Кулида и др., 2023]. В соответствии с Федеральными авиационными правилами «Организации воздушного движения» потенциальные конфликты ВС могут быть разрешены изменением времени вылета, скорости, эшелона полёта или параллельным смещением фрагмента траектории на участке конфликта. С учётом этого необходимо проводить деконфликтацию ПП. На рис. 5 для наглядности приведен пример разрешения конфликта двух ПП. Коричневым цветом обозначены профили исходных ПП, находящихся в опасном сближении, фиолетовым – измененная в результате параллельного смещения часть профиля

⁵ Многофакторный личностный опросник 16PF (Sixteen Personality Factor Questionnaire, 16PF), разработанный под руководством Р. Б. Кеттелла. В авиации этот опросник используют для оценки индивидуально-психологических особенностей личности, в частности, характера, склонностей и интересов.

ПП, синим – часть профиля ПП при запланированной смене эшелона движения, красный цилиндр – объем безопасности в точке максимального сближения на исходной траектории. В случае смещения ПП во времени (изменения скорости ВС) профиль ПП не меняется, поэтому данный вариант на рисунке не приведен.



Рисунок 5 – Варианты разрешения единичного конфликта ПП (для наглядности пропорции траекторий изменены)

В [Григорьев и др., 2022] предложен алгоритм обеспечения установленных интервалов эшелонирования двух ВС в полёте в форме итерационной процедуры определения согласованной совокупности их путевых скоростей с учетом ограничений, установленных правилами полётов с соблюдением принципа гарантированного подхода к обеспечению безопасности результата применения процедуры принятия решения. Суть алгоритма заключается в определении области допустимых параметров движения ВС и нахождении возможных решений численными методами. В случае возникновения риска опасного сближения ВС необходимо выбрать вариант разрешения конфликта ПП, приводящий к наименьшему расходу топлива.

4. Оптимизация множества планов полётов

Множество ПП стремится оптимизировать по критерию минимального расхода топлива при выдерживании заданного уровня безопасности полёта, характеризуемого, например, частотой возникновения опасных сближений в заданной области воздушного пространства. Для оптимизации множества ПП применяются следующие подходы: численной оптимизации, риск-ориентированный, искусственного интеллекта, эргатический и логико-лингвистический. Риск-ориентированный подход заключается в нахождении областей воздушного пространства и периодов времени, в которые риск возникновения авиационных конфликтов наиболее высок, и составлении ПП таким образом, чтобы его минимизировать. Отличительной особенностью от остальных подходов является анализ потенциальных сценариев развития воздушной обстановки, в случае отклонения от сформированных ПП.

ПП, в первую очередь, зависит от длительности полёта, расположения запасных аэродромов, возможности использования воздушного пространства и метеорологических условий [Иванова и др., 2024]. При составлении расписания

авиарейсов используется сопоставительный анализ на основе показателей качества планирования полётов [Шайдуров и др., 2023; Abdelghany et al., 2024].

В настоящее время все еще не решена проблема согласованности и обмена информацией между заинтересованными сторонами в использовании воздушного пространства. При планировании полётов необходимо учитывать динамику различных транспортных потоков, в том числе расписание железнодорожных рейсов с целью обеспечения бесперебойной пересадки пассажиров [Air-rail timetable..., 2024].

С учетом низкой достоверности оценки риска возникновения авиационного конфликта за длительный период времени до вылета ВС предотвращать конфликты ПП на этапе предтактического планирования не всегда целесообразно [Печенежский и др., 2023]. На этапе тактического планирования задачу оптимизации ПП по критерию минимума числа конфликтов N между числом M ПП ВС можно записать в следующем виде [Chaimatanan et al., 2015]:

$$, \quad (3)$$

где $s=(\delta, \omega, l)$ – множество изменяемых параметров, состоящее из следующих элементов: $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M)$ – множество сдвигов профилей ПП во времени (δ_i , при $i = 1, \dots, M$ – сдвиг профиля i -го ПП), в пределах равномерно дискретизированного интервала $[\delta_{t,\min}, \delta_{t,\max}]$, $\delta_{t,\min}$ и $\delta_{t,\max}$ – минимально- и максимально-допустимые времена сдвига δ , $t_i=t_{i,0}+\delta_i$ – реальное время вылета i -го ВС, $t_{i,0}$ – плановое время вылета ВС; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M)$ – множество дополнительных путевых точек во всем множестве ПП, ω_i – множество координат дополнительных путевых точек i -го ПП; $l = (l_1, l_2, \dots, l_M)$ – множество сдвигов высот во всем множестве ПП, l_i – множество сдвигов высот (изменений эшелона полёта) в i -м ПП, с привязкой к участку.

Данная задача является NP-трудной с экспоненциально увеличивающимся временем решения при возрастании размерности M . Решить данную проблему возможно за счет дискретизации воздушного пространства пространственно-временной сеткой (рис. 6), в которой размеры ячеек соответствуют горизонтальным r_t и вертикальным r_v нормам эшелонирования [Chaimatanan et al., 2013]. В случае возникновения конфликта ПП одна либо соседние ячейки сетки заняты ВС. Использование высокоскоростного графического процессора (GPU) позволяет сократить время вычислений во время численной оптимизации на два порядка [Alligier et al., 2018].

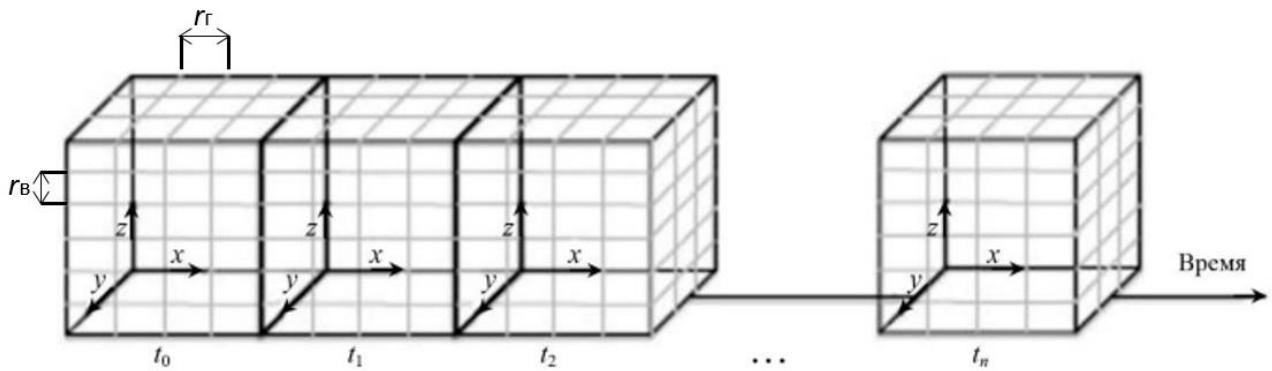


Рисунок 6 – Дискретизация воздушного пространства пространственно-временной сеткой (r_f и r_b – нормы горизонтального и вертикального эшелонирования, соответственно) [Chaimatanan et al., 2013]

В [Kuenz, 2015] описаны способы предотвращения конфликтов ПП за счет параллельного смещения ВС и перехода на другой односторонний эшелон, но не рассмотрены вопросы их совместного использования для минимизации количества конфликтов между ПП, включающем также сдвиги ПП во времени и изменение скоростей ВС. Для выбора наилучшего способа деконфликтизации необходимо логически сравнивать различные способы предотвращения конфликта ПП и выбирать наилучший.

В большинстве случаев целесообразно оптимизировать ПП ВС по критерию минимума числа текущих и прогнозируемых опасных сближений, с учетом заданных ограничений . $f_{K_{\text{одн}}}(tr_j) = |C| \text{prut}_{r_j} N(s) \rightarrow 0$ Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования... Моделирование показало [Kuenz et al., 2013], что более 90% опасных сближений может быть устранено за счет сдвига ПП во времени со смещением до 10 минут. В [Kuenz, 2015] приведена методика минимизации количества конфликтов между ПП ВС (рис. 7).

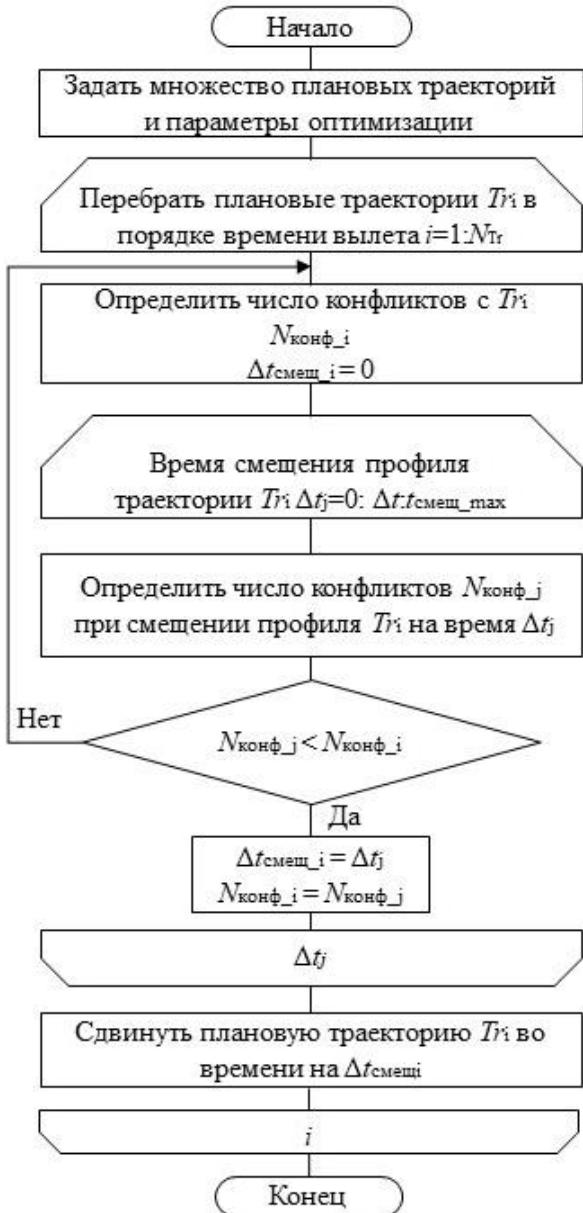


Рисунок 7 – Методика минимизации количества конфликтов между ПП ВС [Kuenz, 2015]

В [Нгуен и др., 2025б] предложена унифицированная методика формирования и коррекции ПП ВС по заданным всеми участниками сообщества ОрВД критериям оптимальности с учётом влияния ветровой обстановки, запретных для полётов зон, движущихся зон сложных метеоусловий и других воздушных судов. Чтобы решить поставленные задачи, применяются многослойные нейронные сети для построения предпочтаемых пользователем ПП на базе обучения данных реализованных полётов по соответствующему маршруту, A-star алгоритм для формирования оптимальных траекторий облета стационарных и перемещающихся зон опасного сближения ВС, а также кривая Безье для сглаживания сформулированных A-star алгоритмом кусочно-линейных траекторий по требованиям к безопасным допускам траекторий полётов ВС (рис. 8).

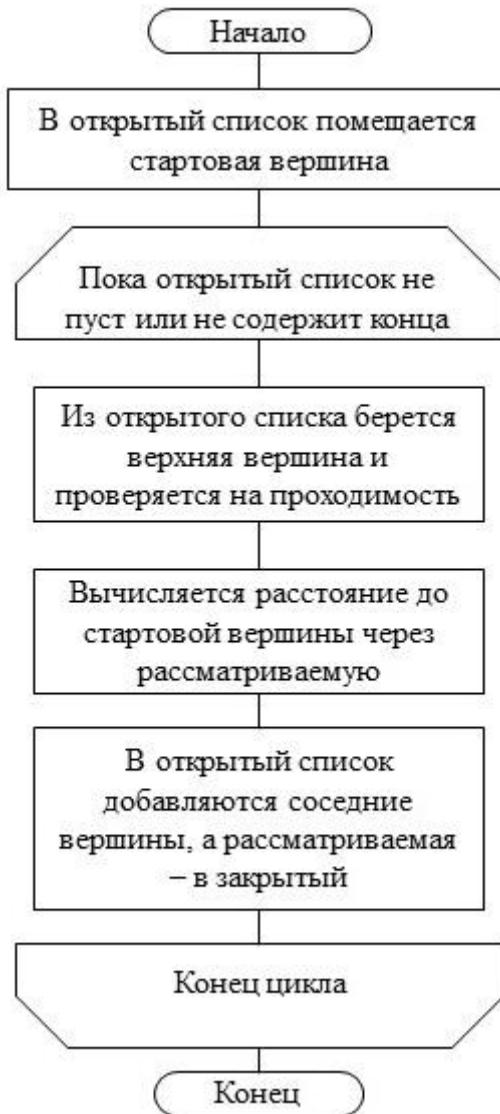


Рисунок 8 – Схема алгоритма A-star [Нгуен и др., 2025а]

Оптимизация множества ПП является эффективным способом увеличения пропускной способности воздушного пространства и снижения его перегруженности. В [Нгуен и др., 2025а] предложено оптимизировать множество ПП на основе алгоритма A-star. Также алгоритм поиска кратчайшего пути A-star возможно использовать для формирования оптимальной траектории обхода [Нгуен и др., 2024].

Данный новый подход помогает избегать ложных предупреждений о потенциальных конфликтных ситуациях в воздухе из-за возможности своевременного их обнаружения и точного определения расстояния от рассматриваемого ВС до зон опасного сближения с запретными для полётов зонами, зонами ограничения полётов, зонами сложных метеоусловий и другими ВС, что и позволяет автономно сформировать временно-пространственную траекторию их обхода.

В [Cafieri et al., 2014] оценена возможность уменьшения общего числа конфликтов между ПП за счет изменения скоростей движения ВС в диапазоне от -6% до +3% от первоначальной, при неизменном маршруте. При небольших

размерностях модель деконфликтации ПП ВС за счет регулирования скорости возможно реализовать с использованием решателя COUENNE [Branching..., 2009]. В [Granger et al., 2003] предложено при планировании полётов отдельно анализировать траектории небольших групп близко движущихся ВС, учитывая гипотезу, что между ними с наибольшей вероятностью возникнет опасное сближение.

В [Chaimatanan et al., 2013] предложено изменять профиль ПП ВС за счет добавления новых путевых точек (рис. 9), обеспечивающих параллельное смещение исходной траектории.

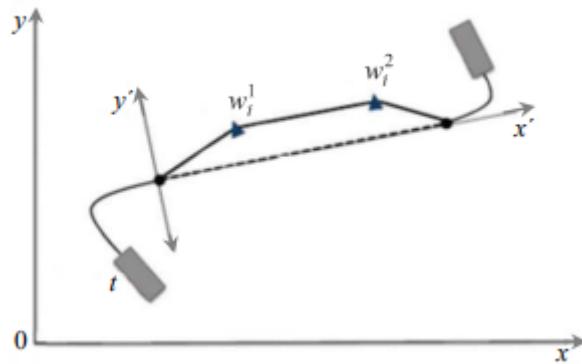


Рисунок 9 – Добавление в траекторию l новых путевых точек w_l^1 и w_l^2 , обеспечивающих параллельное смещение ВС

Для исключения резких маневров ВС новые путевые точки устанавливаются на расстоянии друг от друга не меньше заданного, а длина траектории не должна превышать установленное значение.

В [Куклев, 2017; Куклев, 2021; Куклев и др., 2024] предложено применять технологии искусственного интеллекта (ИИ) при управлении безопасностью полётов в гражданской авиации РФ. Управление безопасностью формируется для структур и состояний систем, определенных в нечетких множествах Fuzzy Sets на основе «уравнения катастрофы» в форме комбинаций логических условий возникновения опасных сценариев (событий) при недостаточном качестве работы системы ОрВД. Также возможно использовать сценарный анализ, основанный на моделировании состояния авиационного предприятия при возможных внешних и внутренних угрозах для безопасности полётов ВС с помощью языка знаковых орграфов [Мельник и др., 2023].

Совместное использование технологий больших данных и ИИ позволит усовершенствовать систему ОрВД за счёт инновационных решений, повышающих безопасность полётов, эффективность и пропускную способность. Основным преимуществом такой интеграции является улучшение процесса принятия решений за счет сбора и анализа больших объемов данных, включающих метеорологическую и аeronавигационную информацию, ПП, текущую и прогнозируемую воздушную обстановку, что позволяет выявлять перегрузки и корректировать ПП. Оптимизация использования ресурсов, таких как маршруты полётов, операции по взлёту и посадке, также способствует увеличению пропускной способности аэропортов и сокращению времени

ожидания и задержек [A Survey ..., 2022; Macedo da Cruz, 2022].

Нейронные сети способны анализировать текущие и прогнозируемые состояния воздушной обстановки, погодные условия, зоны ограничений для расчёта наилучшей траектории и выбора оптимального маршрута полёта. Их возможно использовать для создания ПП [Лебедев, 2025]. Недостатком нейронных сетей и методов искусственного интеллекта в целом является низкий уровень доверия к результатам, что не всегда приемлемо в автоматизированных системах, от которых зависят жизни людей. По этой причине в настоящее время методы искусственного интеллекта не имеют широкого применения в автоматизированных системах ОрВД и могут выполнять только вспомогательную функцию. Тем не менее внедрение искусственного интеллекта возможно и в такие системы, при организации надёжного контроля результатов его работы и устранении ненадежных результатов с использованием других подходов [A Survey ..., 2022].

Системы планирования полётов, организованные по принципу сетецентричности, повышают ситуационную осведомленность диспетчера за счет создания общей базы данных планов полётов, аэродинамических данных и параметров ВС, аeronавигационных данных статических и динамических, доступ к которым в режиме реального времени имеют все средства КСА ПИВП [Патент № 2746058 С9..., 2021; Патент № 2773453..., 2022; Patent US 9697737B2..., 2017]. Способ динамического планирования полётов [Патент US 11854407..., 2023] включает в себя сетевую модель воздушного пространства, для каждого ВС определяется соответствующее ему текущее и конечное положение на маршруте (ребре графа), после чего для каждого ВС определяется набор потенциальных ПП и из них выбирается наилучший по заданному показателю.

5. Синтез алгоритма формирования множества планов полётов

В [Воробьев и др., 2015] предложен алгоритм предтактического планирования полётов. Также различные подходы к планированию полётов приведены в [Замятин и др., 2011; Лазарев и др., 2011; Методика..., 2008]. Принципы автоматизации планирования полётов описаны в [Рудельсон, 2010] и книге⁶.

ПП $Pln = \langle (C_i, h, t)_1, \dots, (C_j, h, t)_M \rangle$, $i=1, \dots, M$ представляют собой последовательность кортежей $(C_i, h, t)_j$ из контрольных точек $C_i = (lat, lon)$ с сопоставленными им временами их пролета t и высотами h , где lat – широта, lon – долгота.

На рис. 10 в обобщенном виде показан алгоритм формирования множества ПП, синтезированный на основе известных подходов.

⁶ Рудельсон Л. Е. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Часть II. Функциональное программное обеспечение. Книга 4 Модель использования воздушного пространства. Обработка плановой информации. М.: МГТУ ГА, 2004. с. 96.

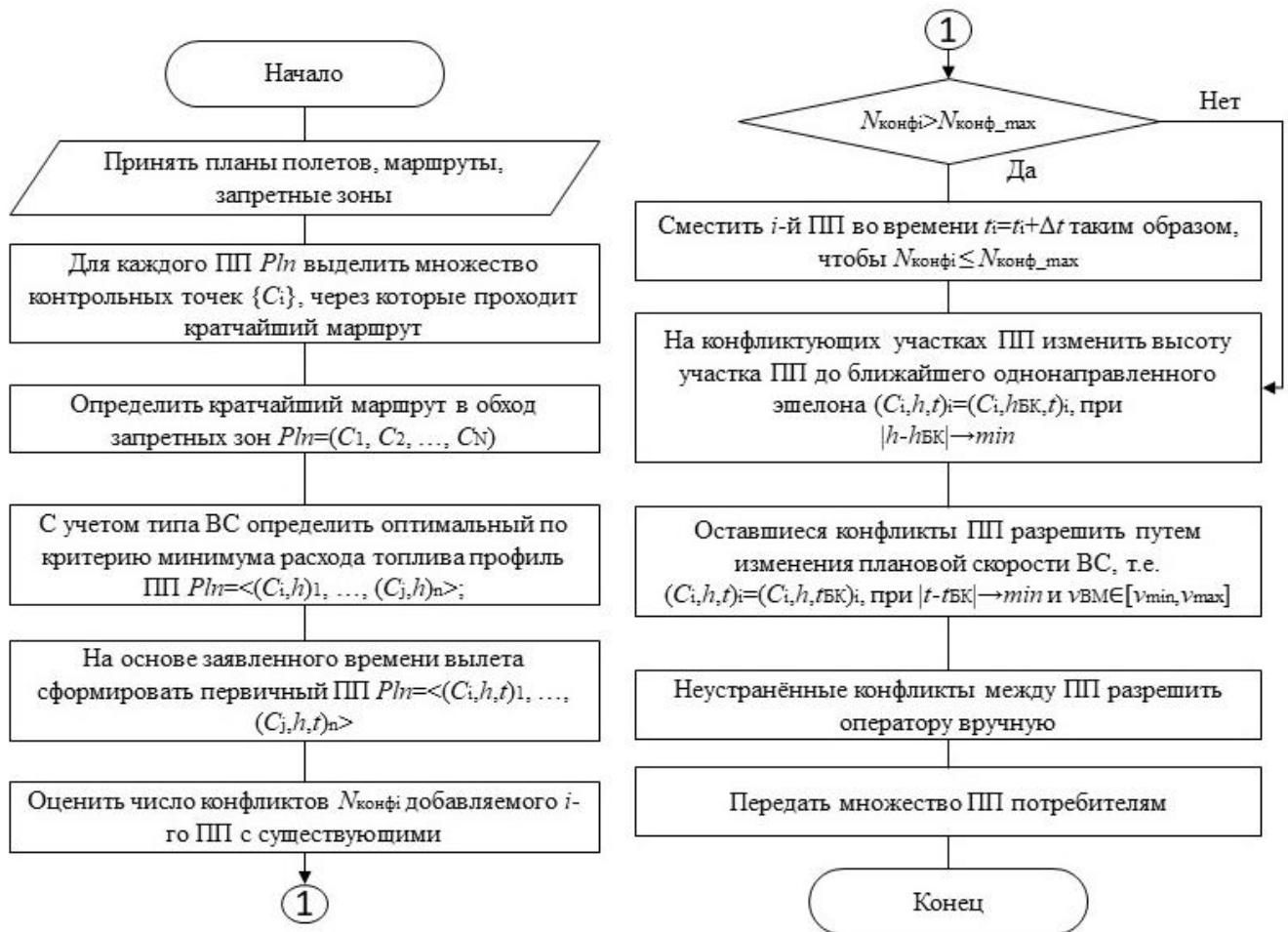


Рисунок 10 – Алгоритм формирования множества планов полётов

Здесь $h_{БК}$ – высота ближайшего к h эшелона полёта, в котором ПП будет бесконфликтным на участке между анализируемыми контрольными точками маршрута.

После выделения множества контрольных точек $\{C_i\}$ определяются зоны воздушного пространства $Res = \{C_k\}$, $k=1\dots,N_{Res}$, через которые не может проходить маршрут во время полёта, например, в результате полётов государственной авиации, плохих метеорологических условий, перегрузки органов ОрВД в результате высокой интенсивности воздушного движения. Для определения кратчайшего маршрута в обход запретных зон можно использовать алгоритм Дейкстры [Dijkstra, 1959]. В случае, если число конфликтов $N_{конфi}$ превышает максимально допустимое $N_{конф_max}$, проводится смещение ПП во времени, т. е. для каждого $t_i = t_i + \Delta t$. В случае, если расстояние r_i между контрольными точками C_i и C_{i+1} существенно больше конфликтующего фрагмента ПП, на его границах в план включаются дополнительные контрольные точки, высоты которых изменяются до $h_{БК}$.

6. Специальное программное обеспечение и комплексы средств автоматизации планирования использования воздушного пространства

В настоящее время в России известны следующие комплексы средств автоматизации планирования использования воздушного пространства (КСА

ПИВП): «СИНТЕЗ-ПИВП» [Свидетельство... № 2022662604, 2022; Свидетельство... № 2021619800, 2021], «Планета» [Свидетельство... № 2019661744, 2019], «Топаз ПИВП» [Свидетельство... № 2016661914, 2016; Свидетельство... № 2016663267, 2016], «ПИВП МДП» [Свидетельство... № 2021661418, 2021], СПО ПИВП «Монитор-план» [Свидетельство... № 2023666403, 2023], КСА ПИВП ГО ПВД [Свидетельство... № 2021611797, 2021]. Данные системы обеспечивают комплексное единое военно-гражданское планирование и автоматизацию функций: стратегическое, предтактическое и тактическое ПИВП; организацию потоков воздушного движения (ОПВД); взаимодействие по плановой, аeronавигационной и справочной информации с другими агентами системы. Наиболее известными зарубежными системами являются N-Flight Planning, FSS Flight Planner, Lido Flight 4D, PPS Flight Planning, ARMS Flight Planning & Dispatch Sub System (FPDS).

КСА ПИВП ЗЦ/УЦ «СИНТЕЗ-ПИВП ЗЦ/УЦ» обеспечивает реализацию в человеко-машинном интерфейсе диспетчера ГО ПВД дополнительных элементов и функций для отображения и обработки ПП и связанных с ними стандартных сообщений в соответствии с требованиями «Табеля сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации».

7. Особые случаи

Известна система планирования и подготовки полётных заданий тактической группы самолётов [Патент РФ № 2147141..., 2000], предназначенная для использования в составе наземных комплексов планирования боевых действий самолётов ударной авиации, и автоматизированная система планирования и контроля использования воздушного пространства региона [Патент № 10898..., 1999]. Данные системы дополнительно включают модули планирования полёта группы ВС, планирования действий в районе цели, дозаправки, сбора в заданные боевые порядки и роспуска.

В [Patent US10540902B2 ..., 2020] предложено создавать ПП с использованием интерактивной карты на сенсорном дисплее в кабине экипажа. В патенте [Патент US 20140018979..., 2014] предложено использовать графический пользовательский интерфейс, включающий трёхмерное виртуальное пространство для полёта беспилотного летательного аппарата.

Results (Результаты)

Исходя из проведенного анализа, укрупненно можно выделить следующие алгоритмы планирования полётов (таб. 1).

Таблица 1 – Подходы планирования использования воздушного пространства

Подход	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
Синтеза маршрутов движения	Через существующие аeronавигационные точки от наиболее интенсивного потока до наименее интенсивного	Позволяет сформировать маршруты движения ВС по заданным	Не позволяет автоматически добавлять дополнительные аeronавигационные

Подход	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
	(без учета других потоков, но с наименьшим числом пересечений с уже существующими маршрутами) прокладываются маршруты, максимально близкие к соответствующей ортодромии. При необходимости вводятся дополнительные аэронавигационные точки. При отсутствии достаточного воздушного пространства для организации независимого маршрута очередной маршрут прокладывается по уже проложенным.	аэронавигационным точкам, близкие к кратчайшим, без превышения максимальнодопустимых интенсивностей потоков ВС.	точки, позволяющие разгрузить маршруты движения ВС.
Управления загрузкой органов ОрВД	Каждому органу ОрВД сопоставляется максимально допустимая пропускная способность. В процессе планирования оценивается их прогнозируемая загрузка. В случае превышения максимально допустимой пропускной способности, оценивается возможность сдвига во времени участка траектории, проходящего через зону ответственности соответствующего органа ОрВД, а также возможность формирования траектории через зоны ответственности других органов ОрВД.	Позволяет выдерживать загрузку органов ОрВД в пределах нормы, а также частично выравнивать ее.	Увеличивает длину траекторий при проведении разгрузки органов ОрВД за счет отдаления от ортодромии.
Оптимизации множества плановых траекторий	В заданной области воздушного пространства оценивается общее число конфликтов ПП. Участки траекторий, характеризующие этапы взлета и посадки,	Уменьшает число конфликтов ПП в заданной области воздушного пространства.	Не позволяет рассчитать оптимальные по заданному критерию (пропускной способности,

Подход	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
	оптимизируются с использованием алгоритмов оптимизации потока вылетов/прилетов. Единичные конфликты разрешаются соответствующими способами. В случае возникновения достаточно большого числа опасных сближений траекторий в пределах зоны ответственности органа ОрВД, выделяются траектории, имеющие наибольшее число конфликтов, и сдвигаются во времени, прокладываются через зоны ответственности других органов ОрВД.		расходу топлива и т.д.) плановые траектории ВС.
Разрешения единичных конфликтов ПП	Единичные конфликты разрешаются вручную одним из нескольких способов: изменением времен прохождения контрольных точек траектории, параллельным смещением траектории, путем добавления новых контрольных точек, векторением, либо переходом на другой эшелон полёта.	Позволяет разрешать единичные конфликты ПП.	При разрешении нескольких конфликтов ПП вблизи друг друга может привести к дополнительным конфликтам ПП.
Оптимизация потока вылетов/прилетов	С учетом заданных временных интервалов между взлетами и посадками ВС, определяемых в зависимости от их весовых категорий, скоростей и расположения ВПП на аэродроме друг относительно друга, определяется порядок взлетов и посадок ВС, повышающий	Позволяет рассчитать оптимальные времена вылетов и прилетов ВС по критериям максимальной пропускной способности аэродрома, минимальной задержки рейса и минимального расхода топлива.	Оптимизирует ПП только на этапах взлета и посадки.

Подход	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
	пропускную способность аэродрома, либо снижающий суммарный расход топлива.		

Conclusion (Заключение)

Проведен анализ научных публикаций, описывающих современные подходы к планированию использования воздушного пространства. Основное внимание уделялось отечественным и зарубежным научным статьям и патентам на изобретения, начиная с 2017 г. На основе анализа источников, исходя из физического смысла и полноты группы, предложена следующая классификация подходов: синтеза маршрутов движения, управления загрузкой органов ОрВД, оптимизации множества ПП, разрешения единичных конфликтов ПП, оптимизации потока вылетов/прилетов. В настоящее время в открытых источниках не приведен алгоритм планирования использования воздушного пространства, позволяющий в автоматическом режиме вычислить оптимальные ПП ВС по критерию максимальной пропускной способности воздушного пространства с ограничениями на расход топлива и др. показатели качества.

Библиографический список

- Баушев С. В. Обоснование и выбор математического аппарата при проведении научных исследований // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО "Алмаз - Антей". 2024. № 14(22). С. 15-37. EDN STOQGN.
- Будков А. С. Анализ проблем, возникающих при выполнении маршрутов четырёхмерной навигации в гражданской авиации, и определение основных путей их решения // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2021. № 1. С. 37-43. DOI 10.51955/2312-1327_2021_1_37. EDN CZLDHK.
- Воробьев В. В. Алгоритм предтактического планирования использования воздушного пространства / В. В. Воробьев, А. С. Харlamov // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 218(8). С. 135-141. EDN UHPYQH.
- Габайдулин Р. Х. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства в ГЦ ЕС ОрВДД / Р. Х. Габайдулин, Д. И. Горячев, И. Ф. Зубкова // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 159. С. 121-127. EDN NUJTM.
- Гимшиян М. К. Методика анализа загруженности диспетчерского персонала региональных центров с учетом уровня автоматизации систем планирования воздушного движения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2024. № 3(44). С. 83-91. EDN CTQGOB.
- Глобальный аeronавигационный план на 2016–2030 гг. Doc 9750-AN/963 Издание пятое. Канада: Международная организация гражданской авиации, 2016. 142 с.
- Григорьев С. В. Управление скоростями воздушных судов для создания безопасных интервалов / С. В. Григорьев, В. М. Затонский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 3(36). С. 107-117. EDN VPXBTR.
- Демин Б. Е. Логико-лингвистический подход к представлению знаний в информационных системах // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 3(25). С. 15-18. EDN JWXBLX.
- Жук А. А. Планирование оптимального маршрута движения беспилотного летательного

аппарата по критерию минимума общего расхода топлива / А. А. Жук, В. М. Булоичик, С. В. Акулич // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 3. С. 43-49. DOI 10.21122/2309-4923-2022-3-43-49. EDN CULEQB.

Замятин А. А. Введение в стохастические модели транспортных потоков / А. А. Замятин, В. А. Малышев // Московский центр непрерывного математического образования. 2011. С. 247-287.

Иванова П. И. Порядок расчета рейсов гражданскими авиакомпаниями на всех этапах планирования полетов / П. И. Иванова, В. К. Печенежский, Е. К. Чувиковская // Автоматизация. Современные технологии. 2024. № 7. С. 322-325.

Казаков К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // Труды Института системного программирования РАН. 2016. Т. 28, № 4. С. 241-294. DOI 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14. EDN WWQYLT.

Княжеский А. Ю. Современное состояние и перспективы развития систем планирования использования воздушного пространства. Часть 1 / А. Ю. Княжеский, С. В. Баушев // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2025. №1. С. 86-104. DOI 10.51955/2312-1327_2025_1_86. EDN UWRQIW.

Куклев Е. А. Интеллектуальная поддержка принятий решений при управлении безопасностью полетов поставщиков услуг гражданской авиации на основе сценарного моделирования редких событий / Е. А. Куклев, Д. М. Мельник // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Материалы XXXII международной конференции, посвященной памяти Владимира Васильевича Кульбы, Заслуженного деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, профессора, Москва, 13 ноября 2024 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 514-521. EDN JIKLQE.

Куклев Е. А. Моделирование опасных сценариев событий при эксплуатации транспортных систем в условиях неопределенности ситуаций // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 3(94). С. 28-32. EDN RQUWKQ.

Куклев Е. А. Определение показателей безопасности полетов воздушных судов на основе риск-ориентированного подхода ИКАО - НАСА // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 3(16). С. 5-15. EDN ZWDPOZ.

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.

Лазарев А. А. Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы // МГУ им. М.В. Ломоносова - 2011. 222 с.

Лебедев К. А. Построение оптимального воздушного маршрута летательного аппарата с использованием искусственного интеллекта // Вестник науки. 2025. Т. 1, № 6(87). С. 1476-1482. EDN GSJSIV.

Лошаков А. В. Способы повышения пропускной способности аэропорта / А. В. Лошаков, А. В. Сучков, С. В. Аверин // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2023. №2 (102). С. 49-53.

Мельник Д. М. Сценарный анализ в управлении безопасностью полетов на авиационном предприятии гражданской авиации / Д. М. Мельник, Е. А. Куклев // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Материалы XXXI международной конференции, Москва, 13 декабря 2023 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. С. 366-375. DOI 10.25728/iccss.2023.64.99.050. EDN VQIMOB.

Методика автоматизированного проектирования организации воздушного пространства в регионе ОВД. М.: Госкорпорация по ОрВД, 2008. 55 с.

Нгуен Н. Х. К. Математическая модель и применение алгоритма A-star для оптимизации маршрутов ОВД в воздушном пространстве районного диспетчерского центра Хошимина / Н. Х. К. Нгуен, В. Н. Нечаев, В. Б. Малыгин // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2025. № 1 (44). С. 64-85. DOI 10.51955/2312-1327_2025_1_64. EDN

XGLVST.

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.

Нгуен Т. Л. Ф. Унифицированная методика планирования оптимальных четырёхмерных траекторий полёта на крейсерском этапе при организации воздушного движения / Т. Л. Ф. Нгуен, Е. С. Неретин, Н. М. Нгуен // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2025. № 1 (44). С. 22-45. DOI 10.51955/2312-1327_2025_1_22. EDN RJMVRB.

Нечеткий логико-лингвистический алгоритм обнаружения инцидентов в киберфизических системах / Н. В. Чикалов, М. Е. Березин, Ю. А. Гатчин, В. И. Поляков // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022 : Сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Коломна, 16–19 мая 2022 года. Том 1. Коломна: Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация искусственного интеллекта», 2022. С. 156-167. EDN ILXFUC.

Олексин С. Л. Разработка концепции системы показателей сложности технологических процессов ОВД // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2024. № 1(42). С. 45-53. EDN DZDCMD.

Патент на полезную модель № 10898 U1 Российская Федерация, МПК G06F 15/16. Автоматизированная система планирования и контроля использования воздушного пространства региона : № 99104216/20 : заявл. 01.03.1999 : опубл. 16.08.1999 / Я. В. Безель, В. И. Лотарев, Ю. С. Цапин [и др.] ; заявитель Московский научно-исследовательский институт приборной автоматики. EDN FBRIJE.

Патент № 2147141 C1 Российская Федерация, МПК G06F 15/00. система планирования и подготовки полетных заданий тактической группы самолетов : № 99108140/09 : заявл. 21.04.1999 : опубл. 27.03.2000 / Г. И. Джанджава, Г. И. Герасимов, Ш. Ф. Чарышев [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество Раменское приборостроительное конструкторское бюро. EDN ZQUAAL.

Патент № 2746058 C9 Российская Федерация, МПК G08G 7/00, G08G 5/00, G06F 17/00. Способ и устройство управления воздушным движением : № 2020124442 : заявл. 23.07.2020 : опубл. 14.12.2021 / Н. С. Логунов, А. М. Миролюбов, А. А. Сайдов ; заявитель Закрытое акционерное общество "Азимут-Альянс". EDN NUYWNR.

Патент № 2773453 C1 Российская Федерация, МПК G01C 23/00. Комплексная система планирования применения и подготовки полетных заданий группе летательных аппаратов : № 2021114364 : заявл. 21.05.2021 : опубл. 03.06.2022 / Д. В. Сухомлинов, Ю. В. Полховцев, К. В. Епишин [и др.] ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. EDN REAXZM.

Патент № 2798628 C1 Российская Федерация, МПК G05D 1/00, G01C 23/00, B64C 19/00. Способ определения оптимального маршрута обхода летательным аппаратом зон грозовой деятельности и ливневых осадков : № 2023103231 : заявл. 13.02.2023 : опубл. 23.06.2023 / И. А. Ядров. EDN XYYWCC.

Патент US 11854407 B2 System and method for airspace planning, G08G 5/00 : US17963771, заявл. 11.10.2022, опубл. 26.12.2023 / James W. Herriot.

Патент US 20140018979 A1 Autonomous airspace flight planning and virtual air-space con-tainment system, G08G 5/00 : заявл. 12.06.2013, опубл. 16.01.2014 / Emray R. Goossen, Kathe-rine Goossen, Scott H. Lafler

Печенежский В. К. Особенности организации планирования использования воздушного пространства в РФ на примере Московской воздушной зоны / В. К. Печенежский, Е. К. Чувиковская // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26, № 6. С. 47-57. DOI 10.26467/2079-0619-2023-26-6-47-57. EDN VJOFJZ.

Рудельсон Л. Е. Алгоритмические задачи автоматизации планирования использования

воздушного пространства // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 159. С. 113-120. EDN NUJTMB.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666403 Российской Федерации. Специальное программное обеспечение планирования использования воздушного пространства (СПО ПИВП "Монитор-план") : № 2023665361 : заявл. 20.07.2023 : опубл. 31.07.2023 / С. А. Трофимов, А. А. Разов, А. М. Шепелев [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «МОНИТОР СОФТ». EDN UXJJCK.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663267 Российской Федерации. "Программное обеспечение комплекса средств автоматизации планирования использования воздушного пространства для группы обеспечения планирования воздушного движения "Топаз ПИВП АЦ" : № 2016619319 : заявл. 31.08.2016 : опубл. 29.11.2016 / А. Н. Бочкарев, С. И. Кудаков, С. А. Трофимов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод». EDN ZCNGZT.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661418 Российской Федерации. Прикладное программное обеспечение (ППО) КСА ПИВП ЗЦ/УЦ "синтез-ПИВП ЗЦ/УЦ" РШПИ.00394-04 : № 2021660665 : заявл. 06.07.2021 : опубл. 09.07.2021 ; заявитель Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры». EDN NLVMZC.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661744. Специальное (прикладное) программное обеспечение для сервера плановой информации и автоматизированного рабочего места диспетчера ПИВП (НКПГ.10210-10) комплекса средств автоматизации планирования использования воздушного пространства "Планета-5" : № 2019660110 : заявл. 19.08.2019 : опубл. 06.09.2019 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Фирма "Новые информационные технологии в авиации". EDN LKIPVW. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661914 Российской Федерации. "Программное обеспечение комплекса средств автоматизации планирования использования воздушного пространства "Топаз ПИВП УЦ" : № 2016619302 : заявл. 31.08.2016 : опубл. 25.10.2016 / В. Ю. Асатуров, А. Н. Бочкарев, А. Н. Алексеев [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод». EDN PDEXAW.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611797 Российской Федерации. ГСА ПИВП го ПВД : № 2021611115 : заявл. 05.02.2021 : опубл. 05.02.2021 / С. А. Трофимов, С. В. Федосеев, А. В. Мешенников [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «МОНИТОР СОФТ». EDN JAFTFA.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619800 Российской Федерации. Серверное ПО обработки плановой информации КСА ПИВП ЗЦ (включая задачи ОПВД) РШПИ.00394-03 12 02-5 : № 2021618789 : заявл. 03.06.2021 : опубл. 17.06.2021 / И. В. Буслаев, М. С. Беленькая, И. А. Первушин [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры». EDN INIPIKG.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662604 Российской Федерации. Прикладное по поддержки тс-2013 (с поправкой 2016) в АРМ диспетчера ПИВП АДП РШПИ.00394-02 12 09-1 : № 2022662144 : заявл. 29.06.2022 : опубл. 05.07.2022 / И. В. Буслаев, Е. А. Максимов, Д. Д. Мальцев ; заявитель Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры». EDN MPYEOV.

Табель сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации, 2013, 123 с.

Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (ФАП №239) / Министерство транспорта Российской Федерации, 2011. 139 с.

Шайдуров И. Г. Новые методы организации потоков воздушного движения / И. Г. Шайдуров, Е. В. Тищенко // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2023: Материалы

Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14-15 нояб., 2023. Т. 2. СПб., 2023. С. 48-54

Шейко Э. В. Методика комплексной оценки пропускной способности диспетчерских зон // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 4(41). С. 95-106. EDN QHUSCU.

A Survey on Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic Management: Current Trends and Development with Future Research Trajectory / Degas Augustin, Mir Riyanul Islam, Christophe Hurter et al. // Applied sciences, 2022. P. 1-18.

Abdelghany A. Schedule-level optimization of flight block times for improved airline schedule planning: A data-driven approach / A. Abdelghany, K. Abdelghany, V. S. Guzhva // Journal of Air Transport Management. 2024. № 115(1). p. 102535. DOI 10.1016/j.jairtraman.2023.102535.

Air-rail timetable synchronization: Improving passenger connections in Europe within and across transportation modes / Buire Clara, Narzuoli Aude, Delahaye Daniel, Mongeau Marcel // Journal of Air Transport Management. 2024. № 115. 102526. p.

Alligier R. Efficient Conflict Detection for Conflict Resolution / R. Alligier, N. Durand, G. Alligier // ICRAT 2018, 8th International Conference on Research in Air Transportation. Casteldefels, Spain, 2018.

Branching and Bounds Tightening Techniques for Non-convex MINLP / P. Belotti, J. Lee, L. Liberti, et al. // Optimization Methods and Software. 2009. Vol. 24(4). P. 597–634.

Buffer scheduling for improving on-time performance and connectivity with a multi-objective simulation-optimization model: A proof of concept for the airline industry / Isabelle M. van Schilt, Jonna van Kalken, Iulia Lefter, Jan H. Kwakkel et al. // J. Air Transp. Manag. 2024. 115 c.

Cafieri S. Aircraft Deconfliction with Speed Regulation: New Models from Mixed-Integer Optimization / S. Cafieri, N. Durand // Journal of Global Optimization. 2014. Vol. 58, № 4. P. 613–629.

Chaimatanan S. Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties / S. Chaimatanan, D. Delahaye M. Mongeau // Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015). Cape Town, South Africa. 2015. P. 51–58.

Chaimatanan S. Strategic Deconfliction of Aircraft Trajectories / S. Chaimatanan, D. Delahaye, M. Mongeau // ISIATM 2013, 2nd International Conference on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management. Toulouse, France, 2013.

Dechter R. Generalized best-first search strategies and the optimality of A* / R. Dechter, J. Pearl // Journal of the ACM. 1985. T. 32, № 3. C. 505-536.

Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1, Iss. 1. P. 269-271.

Granger G. A Traffic Complexity Approach through Cluster Analysis / G. Granger, N. Durand // Proceedings of the 5th ATM Research and Development Seminar. Budapest, Hungary, 2003.

Katsigiannis F. A. Incorporating slot valuation in making airport slot scheduling decisions / F. A. Katsigiannis, K. Zografos // European Journal of Operational Research. 2023. Volume 308, Issue 1. P. 436-454. DOI 10.1016/j.ejor.2022.11.008.

Kernighan B. W. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs / B. W. Kernighan, S. Lin // Bell System Technical Journal. 1970. 49 (2). pp. 291-307.

Kuenz A. High Performance Conflict Detection and Resolution for Multi-Dimensional Objects / Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, PhD dissertation. German, 2015. 236 p.

Kuenz A. Individualism in global air-space-user-preferred trajectories in future ATM / A. Kuenz, S. Gunnar, W. Franz-Erich // 32nd Digital Avionics Systems Conference October 6-10, 2013. Germany, pp. 1-13.

Macedo da Cruz André Luiz. Transforming air traffic management with big data and artificial intelligence // International seven journal of multidisciplinary. 2022. № 1(2). P. 1-8. DOI <https://doi.org/10.56238/isevmjv1n2-009>.

Patent EP 2381432 A1 Flight planning methods and systems, G08G 5/00, filed 22.04.2010, published 26.10.2011.

- Patent EP 2561500 B1 Flight planning methods and systems, G08G 5/00, filed 26.04.2011, published 29.07.2020 / Steven Pendry, Timothy Hood, Adrian Christopher Hubbard.
- Patent US10540902B2 Flight planning and communication, MIK G08G 5/00, filed 24.04.2017, published 21.01.2020 / Jeremy Joseph Kneuper, John Robert Lanier, Jason Michael Decker.
- Patent US9697737B2 Automatic real-time flight plan updates, MIK G08G 5/00, filed 30.09.2014, published 04.07.2017 / Ryan D. HaleLouis J. Bailey.

References

- Abdelghany A., Abdelghany K., Guzhva V. S. (2024). Schedule-level optimization of flight block times for improved airline schedule planning: A data-driven approach. *Journal of Air Transport Management*. 115(1): 102535.*
- Alligier R., Durand N., Alligier G. (2018). Efficient Conflict Detection for Conflict Resolution. *ICRAT 2018, 8th International Conference on Research in Air Transportation*. (8): 1-8.*
- Baushev S. V. (2024). Justification and selection of mathematical apparatus in conducting scientific research. *Radio navigation and time: works of the North-West Regional Center of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern*. 14 (22): 15-37.*
- Belotti P., Lee J., Liberti L., et al. (2009). Branching and Bounds Tightening Techniques for Non-convex MINLP. *Optimization Methods and Software*. 24(4): 597–634.*
- Budkov A. S. (2021). Analysis of problems arising during the implementation of four-dimensional navigation routes in civil aviation, and determination of the main ways to solve them. *Crede Experto: transport, society, education, language*. (1): 37-43. [In Russian]*
- Buire C., Marzuoli A., Delahaye D., Mongeau M. (2024). Air-rail timetable synchronisation: Improving passenger connections in Europe within and across transportation modes. *Journal of Air Transport Management*. (115): 1-21.*
- Cafieri S., Durand N. (2014). Aircraft Deconfliction with Speed Regulation: New Models from Mixed-Integer Optimization // *Journal of Global Optimization*. 58(4): 613–629.*
- Certificate of state registration of computer program No. 2016661914 Russian Federation. "Software for the airspace use planning automation system "Topaz PIVP UC": No. 2016619302: declared 31.08.2016: published 25.10.2016 / V. Yu. Asaturov, A. N. Bochkarev, A. N. Alekseev [et al.]; applicant Joint-Stock Company "Scientific and Production Association "Lianozovsky Electromechanical Plant".
- Certificate of state registration of computer program No. 2016663267 Russian Federation. "Software for the airspace planning automation system for the air traffic planning support group "Topaz PIVP AC": No. 2016619319: declared 31.08.2016: published 29.11.2016 / A. N. Bochkarev, S. I. Kudakov, S. A. Trofimov [et al.] ; applicant Joint-Stock Company "Scientific and Production Association "Lianozovsky Electromechanical Plant".
- Certificate of state registration of computer program No. 2019661744. Special (application) software for the server of scheduled information and the automated workplace of the PIVP dispatcher (NKPG.10210-10) of the Planeta-5 airspace use planning automation complex: No. 2019660110 : declared 19.08.2019 : published 06.09.2019 ; applicant Limited Liability Company "Firm "New Information Technologies in Aviation".
- Certificate of state registration of computer program No. 2021611797 Russian Federation. GSA PIVP go PVD: No. 2021611115: declared 05.02.2021: published 05.02.2021 / S. A. Trofimov, S. V. Fedoseyev, A. V. Meshennikov [et al.]; applicant Limited Liability Company MONITOR SOFT.
- Certificate of state registration of computer program No. 2021619800 Russian Federation. Server software for processing planned information KSA PIVP ZTs (including OPVD tasks) RShPI.00394-03 12 02-5: No. 2021618789: declared 03.06.2021: published 17.06.2021 / I. V. Buslaev, M. S. Belenkaya, I. A. Pervushin [et al.]; applicant Joint-Stock Company "Order of the Red Banner of Labor All-Russian Research Institute of Radio Equipment".
- Certificate of state registration of computer programs No. 2021661418 Russian Federation. Application software (AS) KSA PIVP ZC/UC "sintez-PIVP ZC/UC" RShPI.00394-04 :

No. 2021660665 : declared 06.07.2021 ; published 09.07.2021 ; applicant Joint-Stock Company "All-Russian Scientific Research Institute of Radio Equipment of the Order of the Red Banner of Labor". Certificate of state registration of the computer program No. 2022662604 Russian Federation. Application for support of TS-2013 (with amendment 2016) in the automated workplace of the dispatcher PIVP ADP RShPI.00394-02 12 09-1: No. 2022662144: declared. 29.06.2022: published. 05.07.2022 / I. V. Buslaev, E. A. Maksimov, D. D. Maltsev; applicant Joint-Stock Company "Order of the Red Banner of Labor All-Russian Research Institute of Radio Equipment".

Certificate of state registration of the computer program No. 2023666403 Russian Federation. Special software for airspace use planning (SPO PIVP "Monitor-plan"): No. 2023665361: declared. 20.07.2023: publ. 31.07.2023 / S. A. Trofimov, A. A. Razov, A. M. Shepelev [et al.]; applicant Limited Liability Company MONITOR SOFT.

Chaimatanan S., Delahaye D., Mongeau M. (2015). Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties. *Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015)*. Cape Town, South Africa: 51–58.

Chaimatanan S., Delahaye D., Mongeau M. Strategic Deconfliction of Aircraft Trajectories. *ISIATM 2013, 2nd International Conference on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management*: 2013.

Chikalov N. V., Berezina M. E., Gatchin Yu. A., Polyakov V. I. (2022). Fuzzy logical-linguistic algorithm for detecting incidents in cyber-physical systems. *Integrated models and soft computing in artificial intelligence IMMV-2022: Collection of scientific papers of the XI International scientific and practical conference. In 2 volumes.* (1): 156-167. [In Russian]

Dechter R., Pearl J. (1985). Generalized best-first search strategies and the optimality of A*. *Journal of the ACM*. 32(3): 505-536.

Degas Augustin, Mir Riyanul Islam, Christophe Hurter at al. (2022). A Survey on Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic Management: Current Trends and Development with Future Research Trajectory. *Applied sciences*. 12(3): 1-18.

Demin B. E. (2006). Logical-linguistic approach to knowledge representation in information systems. *Control systems and information technologies*. 3(25): 15-18. [In Russian]

Dijkstra E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik. Springer Science+Business Media*. 1(1): 269-271.

Federal aviation regulations "Organization of Air Traffic in the Russian Federation" (FAP No. 239). *Ministry of Transport of the Russian Federation*. 2011. 139 p.

Gabeidulin R. Kh. Goryachev D. I., Zubkova I. F. (2010). Algorithmic and software support for the automated airspace planning system in the Unified Air Traffic Control Center. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. (159): 121-127. [In Russian]

Gimishyan M. K. (2024). Methodology for analyzing the workload of regional center dispatch personnel taking into account the level of automation of air traffic planning systems. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 3 (44): 83-91. [In Russian]

Global Air Navigation Plan 2016-2030. Doc 9750-AN / 963 Fifth edition. *International Civil Aviation Organization*. 2016. 142 p.

Granger G., Durand N. (2003). A Traffic Complexity Approach through Cluster Analysis. *Proceedings of the 5th ATM Research and Development Seminar*. (1): 1-10.

Grigoriev S. V., Zatonsky V. M. (2022). Aircraft speed control to create safe intervals. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 3 (36): 107-117. [In Russian]

Ivanova P. I., Pechenizhsky V. K., Chuvikovskaya E. K. (2024). The procedure for calculating flights by civil airlines at all stages of flight planning. *Automation. Modern technologies*. (7): 322-325. [In Russian]

Katsigiannis Fotios A., Zografos Konstantinos G. (2022). Incorporating slot valuation in making airport slot scheduling decisions. *European Journal of Operational Research*. (1): 436-454.

Kazakov K. A., Semenov V. A. (2016). Review of modern traffic planning methods. *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*. (28)4: 241-294.

Kernighan B. W., Lin S. (1970). An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *Bell System*

Technical Journal. 49 (2): 291–307.

Knyazhsky A. Yu., Baushev S. V. (2025). Current state and prospects for the development of airspace planning systems. Part 1. *Crede Experto: transport, society, education, language.* (1): 86-104. [In Russian]

Kuenz A. (2015). High Performance Conflict Detection and Resolution for Multi-Dimensional Objects. *Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, PhD dissertation:* 236.

Kuenz A., Gunnar S., Franz-Erich W. (2013). Individualism in global air-space-user-preferred trajectories in future ATM. *32nd Digital Avionics Systems Conference October 6-10:* 1-13.

Kuklev E. A. (2017). Definition of aircraft flight safety indicators based on the ICAO - NASA risk-based approach. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation.* 3(16): 5-15. [In Russian]

Kuklev E. A. (2021). Modeling of hazardous event scenarios during operation of transport systems in conditions of uncertainty of situations. *Transport of the Russian Federation.* 3(94): 28-32. [In Russian]

Kuklev E. A., Melnik D. M. (2024). Intelligent decision support for flight safety management of civil aviation service providers based on scenario modeling of rare events. *Problems of safety management of complex systems: Proceedings of the XXXII international conference dedicated to the memory of Vladimir Vasilyevich Kulba, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow, November 13, 2024. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences.* (32): 514-521. [In Russian]

Kulida E. L., Lebedev V. G. (2023). Methods for solving problems of planning and regulating air traffic flows. Part 1. Strategic planning of four-dimensional trajectories. *Problems of Management.* (1): 3-14. [In Russian]

Lazarev A. A. Gafarov E. R. (2011). Scheduling Theory. Problems and Algorithms. *Moscow State University named after M.V. Lomonosov:* 222. [In Russian]

Lebedev K. A. Construction of an optimal air route for an aircraft using artificial intelligence // *Bulletin of Science Volume 1.* 6(87): 1476. [In Russian]

Loshakov A. V., Suchkov A. V., Averin S. V. (2023). Ways to increase airport capacity. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University.* 2 (102): 49-53. [In Russian]

Macedo da Cruz André Luiz. (2022). Transforming air traffic management with big data and artificial intelligence. *International seven journal of multidisciplinary.* 1(2): 1-8.

Melnik D. M., Kuklev E. A. (2023). Scenario analysis in flight safety management at a civil aviation enterprise. *Problems of safety management of complex systems: Proceedings of the XXXI international conference. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences:* 366-375. [In Russian]

Methodology for automated design of airspace organization in the ATS region. *State ATM Corporation:* 2008. 55.

Nguyen N. H. K., Nechaev V. N., Malygin V. B. (2025). Mathematical model and application of the A-star algorithm for optimization of ATS routes in the airspace of the Ho Chi Minh City regional control center. *Crede Experto: transport, society, education, language.* 1(44): 64-85. [In Russian]

Nguyen T. L. F., Neretin E. S., Nguyen N. M. (2024). Development of a methodology for identifying and resolving conflict situations in the operational planning of a four-dimensional flight trajectory. *Crede Experto: transport, society, education, language.* (2): 77-95.

Nguyen T. L. F., Neretin E. S., Nguyen N. M. (2025). Unified methodology for planning optimal four-dimensional flight trajectories at the cruising stage in air traffic management. *Crede Experto: transport, society, education, language.* 1 (44): 22-45

Oleksin S. L. (2024). Development of the concept of a system of indicators of the complexity of ATS technological processes. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation.* (42): 45-53. [In Russian]

Patent EP 2381432 A1 Flight planning methods and systems, G08G 5/00, filed 22.04.2010, published 26.10.2011.

Patent EP 2561500 B1 Flight planning methods and systems, G08G 5/00, filed 26.04.2011, published

29.07.2020 / Steven Pendry, Timothy Hood, Adrian Christopher Hubbard.

Patent No. 10898 U1 Russian Federation, IPC G06F 15/16. Automated system for planning and monitoring the use of regional airspace : No. 99104216/20 : declared 1999.03.01 : published 1999.08.16 / Bezel Ya.V., Lotarev V.I., Tsapin Yu.S. [et al.]; applicant Moscow Research Institute of Instrument Automation.

Patent No. 2147141 C1 Russian Federation, IPC G06F 15/00. System for planning and preparing flight assignments for a tactical group of aircraft : No. 99108140/09 : declared 21.04.1999 : published 27.03.2000 / G. I. Dzhandzhgava, G. I. Gerasimov, Sh. F. Charyshev [et al.]; applicant Open Joint-Stock Company Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau. EDN ZQUAAL.

Patent No. 2746058 C9 Russian Federation, IPC G08G 7/00, G08G 5/00, G06F 17/00. Air Traffic Control Method and Device: No. 2020124442: declared 23.07.2020: published 14.12.2021 / N. S. Logunov, A. M. Mirolyubov, A. A. Saidov; applicant Closed Joint-Stock Company "Azimuth-Alliance".

Patent No. 2773453 C1 Russian Federation, IPC G01C 23/00. Integrated system for planning the use and preparation of flight tasks for a group of aircraft: No. 2021114364: declared 21.05.2021: published 03.06.2022 / D. V. Sukhomlinov, Yu. V. Polkhovtsev, K. V. Epishin [et al.]; applicant Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation acts.

Patent No. 2798628 C1 Russian Federation, IPC G05D 1/00, G01C 23/00, B64C 19/00. Method for Determining the Optimal Route for an Aircraft to Avoid Thunderstorm Activity and Heavy Rainfall Zones : No. 2023103231 : declared 13.02.2023 : published 23.06.2023 / I. A. Yadrov.

Patent US 11854407 B2 System and method for airspace planning, G08G 5/00 : US17963771, declared 11.10.2022, published 26.12.2023 / James W. Herriot.

Patent US 20140018979 A1 Autonomous airspace flight planning and virtual air-space containment system, G08G 5/00 : declared 12.06.2013, published 16.01.2014 / Emray R. Goossen, Katherine Goossen, Scott H. Lafler.

Patent US10540902B2 Flight planning and communication, MTIK G08G 5/00, filed 24.04.2017, published 21.01.2020 / Jeremy Joseph Kneuper, John Robert Lanier, Jason Michael Decker.

Patent US9697737B2 Automatic real-time flight plan updates, MTIK G08G 5/00, filed 30.09.2014, published 04.07.2017 / Ryan D. HaleLouis J. Bailey.

Pechenizhsky V. K., Chuvikovskaya E. K. (2023). Features of the organization of airspace planning in the Russian Federation on the example of the Moscow air zone. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 26(6): 47-57. [In Russian]

Rudelson L. E. (2010). Algorithmic problems of airspace use planning automation. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. (159): 113-120. [In Russian]

Shaidurov I. G., Tishchenko E. V. (2023). New methods of organizing air traffic flows. *Transport of Russia: problems and prospects – 2023: Proceedings of the International scientific and practical conference*. (2): 48-54. [In Russian]

Sheiko E. V. (2023). Methodology for a comprehensive assessment of the capacity of control zones. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 4(41): 95-106. [In Russian]

Table of messages on the movement of aircraft in the Russian Federation. 2013. 123 p.

Van Schilt Isabelle M., van Kalker Jonna, Lefter Iulia, Kwakkel Jan H. et al. (2024). Buffer scheduling for improving on-time performance and connectivity with a multi-objective simulation-optimization model: A proof of concept for the airline industry. *J. Air Transp. Manag*: 115 (7): 1-10.

Vorobyov V. V., Kharlamov A. S. (2015). Algorithm for pre-tactical planning of airspace use. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 218 (8): 135-141.

Zamyatin A. A., Malyshev V. A. (2011). Introduction to stochastic models of traffic flows. *Moscow Center for Continuous Mathematical Education*: 247-287. [In Russian]

Zhuk A. A., Buloichik V. M., Akulich S. V. (2022). Planning the optimal route of an unmanned aerial vehicle based on the criterion of minimum total fuel consumption. *Systems analysis and applied informatics*. (3): 43-49. [In Russian]