

УДК 004.942

МОДЕЛЬ ЗОН ПОЛЕТОВ СВОБОДНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

О.В. Шарков (Москва)

Введение

Современная авиационная отрасль сталкивается с необходимостью обеспечить устойчивый рост интенсивности воздушного движения, одновременно повышая его безопасность, экономическую эффективность и экологичность. Традиционная архитектура воздушного пространства, основанная на жестко фиксированных маршрутах, зачастую приводит к удлинению траекторий полета, увеличению задержек и концентрации трафика в узловых точках. В качестве альтернативы традиционной архитектуре воздушного пространства была разработана и признана ключевой концепция «Воздушного пространства свободной маршрутизации (Free Route Airspace – FRA)» [1].

FRA – это концепция организации воздушного пространства, в рамках которой пользователи (воздушные суда) имеют возможность планировать полет по прямым маршрутам между точками входа и выхода из данного воздушного пространства, минуя жесткую систему фиксированных трасс. Это позволяет экипажам и службам управления воздушным движением (УВД) выбирать оптимальные траектории с учетом таких факторов, как погодные условия и минимизация времени полета.

Актуальность и необходимость внедрения FRA обусловлены комплексом преимуществ:

1. повышение экономической и экологической эффективности: сокращение протяженности маршрутов приводит к снижению расхода авиатоплива, что уменьшает эксплуатационные расходы авиакомпаний и объем выбросов CO₂;

2. оптимизация пропускной способности: распределение воздушного трафика по произвольным прямым траекториям, а не по ограниченному числу фиксированных маршрутов, позволяет более равномерно и эффективно использовать доступный объем воздушного пространства, снижая нагрузку на диспетчерские службы и устраняя «узкие места»;

3. повышение гибкости: FRA предоставляет пилотам большую свободу в выборе маршрута для обхода зон опасных метеоявлений, что повышает безопасность и регулярность полетов.

Однако, несмотря на очевидные преимущества, прямое и нерегламентированное внедрение FRA сопряжено с серьезными системными рисками. Простое разрешение полетов по прямым маршрутам без тщательного предварительного анализа может привести к:

- спонтанному формированию новых, непредсказуемых точек пересечения траекторий и концентрации конфликтов в неконтролируемых местах;

- резкому увеличению сложности прогнозирования конфликтных ситуаций из-за неструктурированного характера трафика, что может превысить когнитивные возможности диспетчера;

- возникновению непредвиденных и сложных для разрешения конфликтов между воздушными судами, следующими по пересекающимся произвольным траекториям.

В связи с этим внедрение FRA является не административным актом, а сложным процессом системной трансформации, неотъемлемым и критически важным этапом

которого является всестороннее математическое моделирование. Его первостепенными задачами являются:

- оценка безопасности: выявление потенциально опасных зон конфликтов, моделирование различных сценариев движения (включая нестандартные ситуации) и количественная оценка рисков для различных конфигураций FRA;
- сравнительный анализ конфигураций: определение оптимальных параметров зоны FRA (ее географических границ, набора точек входа/выхода, правил использования, необходимости включения промежуточных точек) путем моделирования множества альтернативных сценариев для выбора наиболее сбалансированного решения;
- оценка эргономики и нагрузки на диспетчеров: анализ изменения характера и распределения рабочей нагрузки диспетчеров УВД, прогнозирование «узких мест» и разработка на основе этого адаптированных процедур и протоколов взаимодействия;
- количественная оценка выгод: расчет ожидаемого экономического (сокращение времени полета, экономия топлива) и экологического (снижение выбросов) эффекта для обоснования инвестиций в модернизацию.

Процесс перехода к FRA должен носить итеративный и научно обоснованный характер: от концептуального проектирования к детальному компьютерному моделированию, анализу рисков и оптимизации, лишь затем – к поэтапному внедрению с постоянным мониторингом и корректировкой.

Предварительное моделирование концепции FRA в комплексе имитационного моделирования «КИМ ОрВД» позволяет промоделировать полеты по зонам свободной маршрутизации и произвести сравнительную оценку различных конфигураций зон на основе показателей безопасности, эффективности и практической реализуемости в целях успешной интеграции данной прогрессивной концепции в национальную систему воздушного пространства [2]. Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД) – программный комплекс для поддержки принятия решений экспертами системы ОрВД разработанный ФАУ ГосНИИАС. КИМ ОрВД предназначен для:

- автоматизированного формирования и подготовки моделируемого варианта данных;
- выполнения расчетного моделирования по оценке использования воздушного пространства и эффективности системы;
- оценки предложений по организации воздушного пространства и реконфигурации маршрутов с учетом внедрения перспективных методов навигации, основанных на характеристиках при обслуживании воздушного движения на трассах, в зонах подхода и аэродрома;
- проведения исследований, поддерживающих оценку безопасности полетов в заданных условиях.

Описание концепции FRA

Под воздушным пространством свободной маршрутизации (Free Route Airspace, FRA) понимается часть контролируемого воздушного пространства, в пределах которого полет воздушного судна может выполняться по маршруту с заданной точностью навигации между основными точками, опубликованными в документах аэронавигационной информации. Также существует возможность строить маршрут через внутренние промежуточные точки полета (тип I), не принимая в расчет фиксированную сеть воздушных трасс (рис. 1). То есть информация о доступности определенных маршрутов заменяется информацией о доступности воздушного

пространства. Также воздушное пространство FRA имеет точки прибытия и вылета, однако не имеет трасс. Другими словами, FRA позволяет организовывать прямые маршруты, но только между определенными точками и с учетом необходимости облета запретных зон или временно зарезервированных или сегрегированных объемов воздушного пространства. Воздушные суда, совершающие полет по свободным маршрутам, по-прежнему находятся под контролем диспетчеров для выдерживания норм безопасности и получения разрешения на изменение эшелона.

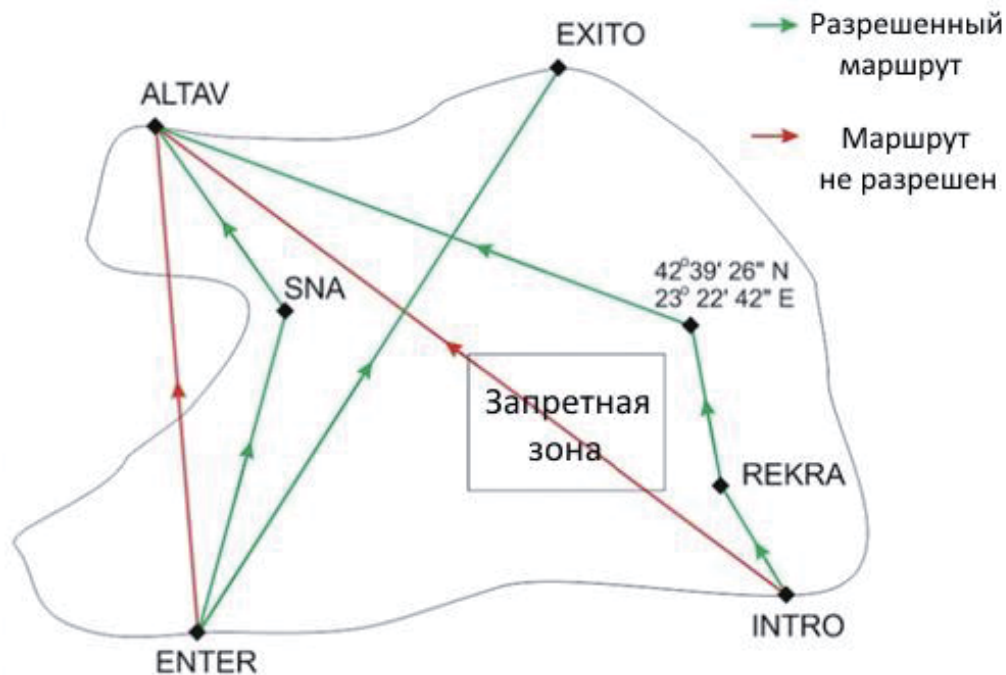


Рис. 1. Воздушное пространство свободной маршрутизации

Эта концепция была разработана Евроконтролем в сотрудничестве с гражданскими и военными экспертами в области организации воздушного пространства государств-членов Европейской конференции гражданской авиации (ЕКГА), поставщиками аэронавигационного обслуживания (ПАНО), пользователями воздушного пространства, органами, осуществляющими планирование полетов, и другими международными организациями. Орган планирования Евроконтроля несет ответственность за реализацию концепции воздушного пространства свободной маршрутизации, обеспечивая общеевропейскую координацию функционирования FRA. Евроконтроль обеспечивает и координирует поэтапное внедрение FRA в европейском воздушном пространстве.

В июне 2008 года в программу Single European Sky (SES) были внесены некоторые дополнения, в результате чего инициатива получила название SES-II. Согласно ей разделение воздушного пространства по границам государств заменяется использованием функциональных блоков воздушного пространства, границы которых спроектированы таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования воздушного пространства. В дальнейшем планируется создать единое воздушное пространство для большинства стран Европейской общей авиационной зоны (European Common Aviation Area, ECAA). Кроме того, при управлении потоками движения будут в большей мере учитываться потребности пользователей ВП, чему, в частности, служит внедрение свободных маршрутов и пространства свободной маршрутизации (FRA).

Очевидным преимуществом пространства свободной маршрутизации является сокращение протяженности маршрутов и налета. Это, в свою очередь, влечет за собой снижение потребления топлива и заметное сокращение выбросов, что положительно влияет на окружающую среду.

Зона FRA задается следующими характеристиками:

- геометрические границы;
- интервал высот;
- временной регламент работы;
- точки FRA.

Точки FRA в данной концепции являются ключевым элементом и обладают множеством свойств для того, чтобы быть адекватной альтернативой традиционной трассовой структуре. Точки FRA характеризуются следующими свойствами:

- код точки;
- координата точки;
- основной тип точки:
 - горизонтальная точка входа FRA (E) – опубликованная основная точка на горизонтальной границе FRA, с которой разрешены полеты FRA;
 - горизонтальная точка выхода FRA (X) – опубликованная основная точка на горизонтальной границе FRA, на которой завершаются полеты FRA;
 - промежуточная точка FRA (I) – опубликованная или неопубликованная основная точка, определяемая географическими координатами или азимутом и расстоянием, через которую разрешены полеты FRA;
- Соединительный(аэродромный) тип точки и ссылки на аэродромы вылета/прибытия:
 - соединительная точка вылета FRA (D) – опубликованная основная точка в среде FRA, до которой разрешается следовать вылетающему воздушному судну с определенного аэродрома;
 - соединительная точка прибытия FRA (A) – опубликованная основная точка в среде FRA, с которой разрешено прибытие воздушного судна на конкретный аэродром;
- интервал высот;
- временной регламент;
- правила эшелонирования (FLOS).

Модель автоматического формирования точек FRA на основе данных об объеме структуры воздушного пространства

Для автоматизации процесса заведения зоны FRA реализована модель автоматического формирования точек FRA на основе данных о воздушном объеме в составе комплекса имитационного моделирования (КИМ ОрВД) [3-5]. Данная модель определяет точки воздушного пространства, которые находятся в окрестностях границы исходного объема, используя геометрические и геодезические функции. Далее полученные граничные точки анализируются для определения основного типа. Анализируются воздушные трассы, содержащие данные точки. Если данная трасса является двунаправленной, то точке проставляется тип EX (вход-выход), в ином случае анализируется направленность трассы относительно выбранного объема. Если трасса направлена к зоне FRA – точке, принадлежащей этой трассе, проставляется тип входной точки (E), в обратном случае такая точка считается выходной (X).

Таким образом, модель автоматического формирования точек FRA на основе данных об объеме структуры воздушного пространства определяет точки воздушного пространства, которые подходят под определение входной/выходной (входной и выходной) на основе информации о точках воздушного пространства и воздушных трассах для выбранного объема (рис. 2).

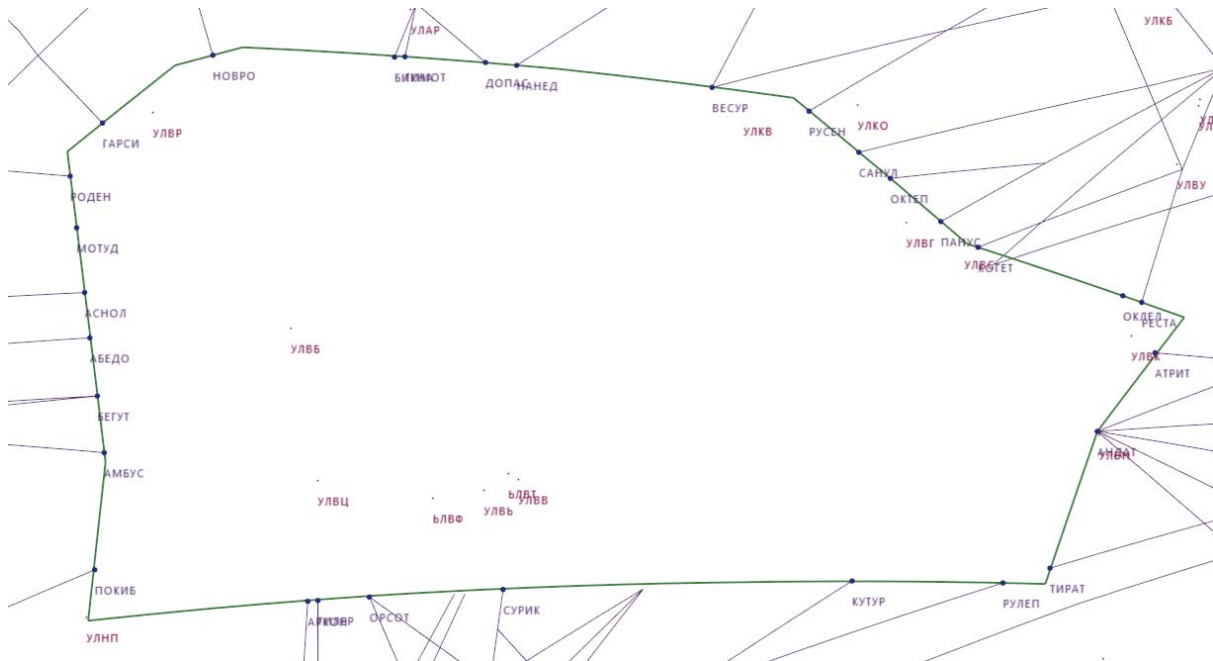


Рис. 2. Автоматическое определение основных точек FRA

Модель ремаршрутизации полетов воздушных судов через зону FRA

Для построения маршрутов (или ремаршрутизации – изменении исходного маршрута воздушного судна) в комплексе используется модель ремаршрутизации. В основе данной модели лежит граф – абстракция, объекты которой обладают парными связями. Граф (его вершины и грани) инициализируется на основе данных о структуре воздушного движения. На этапе инициализации определяются сущности, через которые пролет возможен (вершины графа) и в какую сторону возможно движение (грани) по горизонтальному профилю (без учета ограничений по высотам, временным регламентам).

Для нахождения наиболее оптимального маршрута в графе используется алгоритм обхода A* (A star) – это метод поиска кратчайшего пути в графе, который находит маршрут с наименьшей стоимостью от одной вершины (начальной) к другой (целевой, конечной). В данном подходе для порядка обхода вершин используется эвристическая функция (расстояние + стоимость), где расстояние считается по ортодромии, а функция стоимости рассчитывается в зависимости от выбранного критерия оптимальности маршрута.

В КИМ ОрВД реализованы следующие критерии оптимальности маршрута:

- минимальная дистанция;
- минимальное время;
- минимальный расход топлива;
- близость к изначальному маршруту.
- геометрические границы;
- интервал высот;

При построении ребер внутри зоны FRA используется вспомогательная псевдо-сеть (рис. 3), которая анализирует точки внутри пространства и строит ребра (связь), используя следующие принципы:

- 1) между точками FRA выполняется корректная связь основных типов:
 - точка входа E может быть соединена с точкой выхода (X), входа-выхода (EX), соединительной точкой (I);
 - точка выхода X может быть соединена с точкой входа (E), входа выхода (EX) и соединительной точкой;
 - соединительная точка(I) может быть соединена с точкой входа (E), выхода (X), входа-выхода(EX), и другой соединительной точкой(I);
- 2) рассматриваемые точки находятся в одном вертикальном диапазоне;
- 3) образованная ортодромия между точками не пересекает границы зоны свободных полетов FRA.

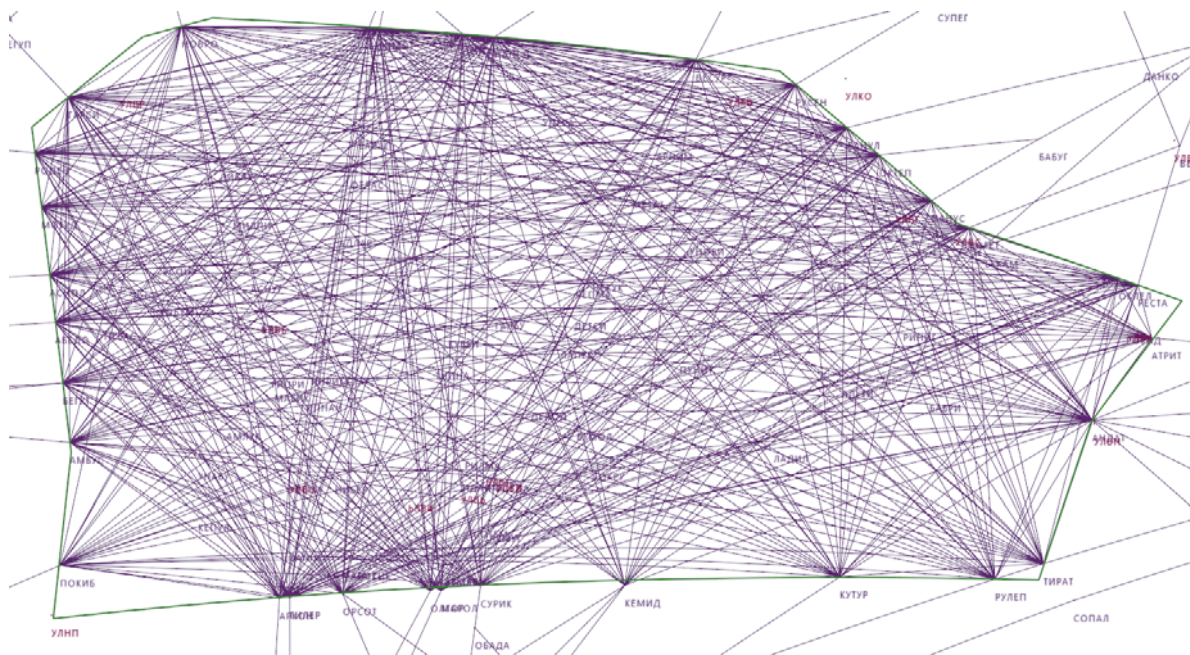


Рис. 3. Визуализация вспомогательной псевдо-сети при ремаршрутизации через зону FRA

Модель формирования 4D маршрута

Полученная псевдо-сеть внутри исследуемой зоны FRA является ребрами графа конкретной зоны FRA, которая будет использоваться на этапе обхода. Именно она характеризует всевозможные 2D маршруты движения внутри данной зоны. Выбор конкретного маршрута для каждого рейса внутри зоны зависит от выбранного критерия оптимальности, исходного маршрута, а также лётно-технических характеристик воздушного судна (ЛТХ ВС).

Преобразование 2D маршрута в 4D траекторию происходит благодаря модели прогнозирования 4D траектории, которая в своей работе использует базу ЛТХ – BADA и по ней моделирует полеты судов, учитывая в том числе вертикальные и временные ограничения.

А – Исходный план полёта по трассовой структуре

Модель оценки показателей эффективности выполнения полетов ВС.

578

выполнения полетов ВС. В качестве основных метрик для оценки внедрения свободной маршрутизации выбраны следующие группы показателей: показатели эффективности для пользователей; показатели экологичности; показатели безопасности; показатель временной загруженности диспетчера.

В табл. 1 приведены показатели, используемые для оценки функционирования ВП свободной маршрутизации.

Таблица 1. Сводная таблица показателей

Показатель	Описание	Необходимые данные	Цель
Показатели эффективности для пользователей			
Протяженность маршрутов	Средняя и суммарная протяженность маршрутов для всех рассматриваемых рейсов	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов	Оценка потенциального влияния FRA на протяженность маршрутов
Налет	Среднее и суммарное время полета для всех рассматриваемых рейсов	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов	Оценка потенциального влияния FRA на время полета ВС
Расход топлива	Средний и суммарный расход	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов, информация о ЛТХ ВС	Оценка потенциального влияния FRA на расход топлива
Удлинение маршрута	Средняя и суммарная разница между протяженностью маршрута рейса и соответствующей этому маршруту дугой большого круга	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов	Оценка потенциального влияния FRA на удлинение маршрута ВС
Показатели экологичности			
Выбросы CO ₂	Среднее и суммарное количество выбросов CO ₂ , рассчитываемое на основе показателя расхода топлива	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов, информация о ЛТХ ВС	Оценка потенциального влияния FRA на окружающую среду
Показатели безопасности			
Количество потенциальных нарушений норм эшелонирования	Число, место и распределение по типам потенциальных нарушений норм эшелонирования	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов, структура ВП, информация о действующих нормах эшелонирования	Оценка потенциального влияния FRA на безопасность выполнения полетов
Показатели пропускной способности ВП			
Временная загруженность диспетчера	Средняя и максимальная временная загруженность диспетчера	Траектории полученные по результатам имитационного моделирования, планы полетов, структура ВП, результаты анкетирования диспетчеров УВД	Оценка потенциального влияния FRA на временную загруженность диспетчера

Показатели эффективности для пользователей ВП

Конкретные значения показателей рассчитываются по следующим принципам:

- «Время полета» – разница между временем вылета из исследуемой области (ВП РФ или РПИ) и временем влета в эту область;
- «Набор», «Снижение», «Крейсер» – в зависимости от значения вертикальной скорости и признака вертикального профиля рассчитывается время нахождения ВС на каждом из трех этапов полета рейса (в секундах);
- «Протяженность» – результат получается путем сложения длин всех участков в исследуемой области;
- «Удлинение» – разница между реальной протяженностью плана полета в исследуемой области и рассчитанной ортодромичной дистанцией между точками входа-выхода в область;
- «Расход топлива» – разница между массой самолета в точке входа в исследуемую область и массой самолета в точке выхода из области.

Показатель экологичности для пользователей ВП

«Выбросы CO₂» – рассчитанное значение потраченной массы топлива для пролета исследуемой области умножается на необходимый коэффициент.

Показатель безопасности

Под потенциальной конфликтной ситуацией (ПКС) подразумевается прогнозируемое нарушение одновременно вертикальных и горизонтальных норм эшелонирования. Таким образом, по результатам работы модели в ПКС будут входить все ситуации, которые требуют вмешательства диспетчера, как для разрешения ПКС, так и для регулирования потока ВС с помощью технологий, предусмотренных структурой ВП.

Выводы

Моделирование концепции полетов свободной маршрутизации FRA с использованием Комплекса имитационного моделирования системы ОрВД (КИМ ОрВД) [2-5] позволяет проверить предлагаемую гипотезу о пользе внедрении зоны FRA и проварьировать параметры зоны FRA.

Имитационное моделирование в КИМ ОрВД дает возможность оценить показатели безопасности, эффективности, экологичности и практической реализуемости полетов в зоне FRA, провести сравнение различных конфигураций и дать рекомендации по используемым параметрам. Это может способствовать ускорению принятия решений по внедрению зон свободных полетов.

Литература

1. EUROCONTROL Free route airspace | EUROCONTROL.
2. **Попов А.С.** Методы, математические модели и комплекс программ для выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования: дис. ... канд. техн. наук: 1.2.2. МАИ, Москва, 2022 - 168 с.
3. **Вишнякова Л.В., Вересов К.А., Зубкова И.Ф., Обухов Ю.В., Петрова А.В., Попов А.С., Сикачев В.Ю., Скавинская Д.В., Топин В.А.** Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения, Журнал «Полёт», 2021, №7. С. 22-37 (№1730, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).
4. **Вишнякова Л.В., Дегтярев О.В., Попов А.С.** Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) // Всерос. науч.

практич. конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС). Труды конференции М., 2012. С.59-67.

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