

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

На правах рукописи

**ЕРМОШЕНКО
ЮЛИЯ МАРКОВНА**

**АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЛЁТОВ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Специальность 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Болелов Эдуард Анатольевич

Москва 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕКУЩАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МЕТЕОИНФОРМАЦИЯ, ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И РЕГУЛЯРНОСТЬ ПОЛЕТОВ. РОЛЬ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТЕОИНФОРМАЦИИ	14
1.1. Анализ влияния на безопасность и регулярность полетов текущей и прогностической метеоинформации	14
1.2. Оценка риска предстоящего полета с учетом достоверности метеорологической информации	26
1.3. Расчет потребного запаса топлива на предстоящий полет с учетом текущих и прогностических метеорологических условий на маршруте полета	32
1.4. Роль данных радиозондирования в обеспечении достоверности метеоинформации	41
Выводы по главе 1	49
ГЛАВА 2. ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	51
2.1. Краткая характеристика радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы	51
2.2. Структура системы комплексной обработки данных радиозондирования атмосферы. Уровни и режимы обработки данных радиозондирования	57
2.3. Требования к комплексной системе радиозондирования атмосферы	62
Выводы по главе 2	65
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ	

ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	69
3.1. Постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	69
3.2. Оптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	80
3.3. Квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	82
Выводы по главе 3	88
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	91
4.1. Методики оценки помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	92
4.2. Оценка потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	96
4.3 Оценка фактически достижимых характеристик помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда	101
4.4. Оценка степени критичности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений	103
4.5. Рекомендации по размещению и применению комплексной системы радиозондирования атмосферы	107
Выводы по главе 4	112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
Список литературы	121
Список сокращений	137
Приложение А. Методика оценки риска предстоящего полета	141
Приложение Б. Расчеты метеоролога аэродромной метеослужбы с использованием данных радиозондирования	145
Приложение В. Характеристика систем радиозондирования атмосферы	163
Приложение Г. Погрешности измерения пространственных координат радиозонда радиолокационным методом	165
Приложение Д. Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Несмотря на мировую пандемию COVID-19 и экономические санкции, которые лишь на время затруднили деятельность отечественной гражданской авиации (ГА), современный этап ее развития в целом характеризуется нарастающими тенденциями роста внутренних и международных авиаперевозок.

Наивысшим приоритетом в деятельности ГА является обеспечение безопасности полетов. Безопасность полетов в свою очередь зависит от множества факторов, важнейшими из которых являются метеоусловия полета (МУ).

По причине неблагоприятных МУ происходят до 20% авиационных происшествий. Кроме этого, еще в 30% случаев неблагоприятные МУ явились сопутствующей причиной их возникновения [39,40,43]. Очевидно, что безопасность полетов воздушных судов (ВС) может быть обеспечена при условии наличия у экипажей достоверной метеорологической информации о фактической и прогнозируемой погоде на аэродроме вылета, аэродроме назначения, на маршруте полета и на запасных аэродромах. Недостоверная, несвоевременно полученная экипажем ВС или диспетчером управления воздушным движением (УВД) метеорологическая информация может привести к серьезному АП, задержке рейса или посадке на запасной аэродром.

Необходимо отметить, что достоверная метеоинформация требуется уже на этапе подготовки ВС к полету. Эта метеоинформация необходима прежде всего для проведения корректных расчетов потребного запаса топлива (ПЗТ), для информирования экипажа ВС и диспетчеров УВД при разработке необходимых мер для облета опасных метеоявлений (ОМЯ), принятия решений на взлет или посадку, уход на запасной аэродром.

Технические средства проведения метеорологических измерений, в свою очередь, должны обеспечивать своевременное получение и точные данные о

реальном состоянии атмосферы и ОМЯ на маршруте и в районах полетов ВС. Неверная оценка метеобстановки уже на этапе подготовки ВС к полету может привести к непредвиденному изменению маршрута, вынужденному прекращению полета, что неминуемо вызовет задержку прибытия рейса в аэропорт назначения или задержку рейса в аэропорту вылета, а в некоторых случаях и к АП.

Одним из приоритетов Транспортной стратегии России является решение вопросов, связанных с ликвидацией «узких мест» в развитии пропускных и провозных возможностей воздушного транспорта. Среди этих «узких мест» имеет место не только отставание, причем подчас существенное, в развитии и совершенствовании средств метеонаблюдений, но, одновременно, и недостаточно полное использование уже имеющихся возможностей, технологий и информации, предоставляемых органами метеонаблюдений на сетях Росгидромета, аэродромах и по трассам полётов ВС.

Существенное влияние на качество текущей и прогностической метеоинформации на всех этапах полета оказывают данные радиозондирования атмосферы. Именно на их основе формируются метеопрогнозы и метеосводки о состоянии атмосферы и ОМЯ на маршруте полета (SIGMET, AIRMET, GAMET), которые могут повлиять на регулярность и безопасность полетов ВС. Данные радиозондирования учитываются при разработке метеопрогнозов и метеосводок по аэродромам (METAR, TAF и TREND).

Имеющиеся в настоящее время технические средства радиозондирования атмосферы не позволяют авиационным потребителям с полным доверием относиться к данным, поступающим от аэрологической сети Росгидромета. Вместе с тем, использование достоверных данных о текущем и прогнозируемом состоянии атмосферы на всех высотах по маршруту полета ВС, позволило бы оптимизировать планирование полётов, существенно повысить экономичность, регулярность и, в не малой мере, безопасность полетов.

Таким образом, в настоящее время объективно существует **противоречие практического характера** между требованиями к качеству аэронавигационного и метеорологического обеспечения, проявляющееся в необходимости обеспечения

экипажей ВС, диспетчеров УВД и авиационного персонала, проводящего подготовку ВС к полету, необходимой метеоинформацией на всех этапах полета ВС и достоверностью метеорологической информации, предоставляемой авиационными метеослужбами.

Определяющая роль в прогнозировании погоды для авиационных потребителей принадлежит радиозондированию атмосферы. Именно на основе данных радиозондирования атмосферы составляются метеосводки и метеопрогнозы на маршрутах и в районах полетов ВС ГА, а при разработке метеопрогнозов по аэродрому используются данные радиозондирования атмосферы, в том числе и результаты конкретных выпусков радиозондов.

Вместе с тем, несмотря на важность данных радиозондирования атмосферы для разработки метеопрогнозов и метеосводок по маршрутам полетов и аэродромам, в настоящее время на сети Росгидромета применяются в достаточно большом количестве устаревшие технические средства радиозондирования (БСС АВК-1М), которые обладают не только низкой точностью измерения метеопараметров атмосферы, но и, главным образом, невозможностью применения их в любых условиях эксплуатации, в условиях различной помеховой обстановки. Недостатки, связанные с невозможностью применения систем радиозондирования в любых условиях эксплуатации, в условиях различной помеховой обстановки свойственны и современным системам радиозондирования атмосферы радиолокационного типа (СРЗ РЛ), таким как МАРЛ-А, «Вектор-М», РАМ-2, а также современным системам радиозондирования атмосферы спутникового типа (СРЗ СТ) ПОЛЮС и ПОЛЕТ.

С другой стороны, можно утверждать, что применение отдельно как СРЗ РЛ, так и СРЗ СТ вряд ли позволит использовать весь заложенный в каждой из них потенциал. Существенно повысить достоверность данных радиозондирования можно путем комплексирования этих систем в единую систему радиозондирования комплексного типа (СРЗ КТ). Такие комплексные системы позволят в большей степени использовать возможности систем радиозондирования, устранить практически полностью возникающие «пробелы» в данных радиозондирования, радикально повысить помехоустойчивость и

точность измерений метеопараметров атмосферы, что в конечном итоге повысит достоверность предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации. Однако, в настоящее время практически отсутствуют алгоритмы комплексной обработки информации, а имеющиеся алгоритмы обеспечивают комплексирование лишь на вторичном уровне, т.е. на уровне обработки выходных данных. Существенного же выигрыша в достоверности данных радиозондирования можно достичь лишь на уровне первичной комплексной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы.

В связи с этим, возникает **противоречие научного характера** между необходимостью повышения достоверности данных радиозондирования путем комплексной обработки метеоинформации на уровне обработки радиосигналов и отсутствием алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

На основе имеющихся противоречий можно сформулировать актуальную **научно-техническую задачу** повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы, предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации. Особая актуальность решения данной задачи связана прежде всего с отсутствием в настоящее время на сети радиозондирования Росгидромета комплексных технических систем, позволяющих обеспечить достоверность данных о состоянии атмосферы в любых условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке.

Разработанность темы исследования.

Большой вклад в решение теоретических и прикладных задач повышения уровня безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации внесли Е.Ю. Барзилович, В.С. Шапкин, М.Ю. Чинючин, В.В. Воробьев, В.Г. Воробьев, Б.В. Зубков, Н.И. Плотников, С.Е. Прозоров, Р.В. Сакач, Н.Н. Смирнов и др..

Теоретические и прикладные вопросы метеорологического обеспечения полетов, разработки методов измерения параметров атмосферы излагаются в трудах О.Г. Богаткина, Э.А. Болелова, А.М. Баранова, В.Ф. Говердовского, А.И.

Ермаковой, Ю.П. Переведенцева, В.Г. Глазунова, А.С. Зверева, В.Д. Рубцова, А.И. Логвина, Рудельсона Л.Е.

В области развития систем радиозондирования атмосферы имеются теоретические и практические исследования П.А. Молчанова, П.Ф. Зайчикова, О.В. Марфенко, В.Д. Решетова, Г.П. Трифонова, А.Ф. Кузенкова, А.Б. Калиновского, Н.З. Пинуса, М.В. Кречмера, М.Б. Фридзона, В.Э. Иванова, С.П. Ессяк и др.

Важно отметить перспективные разработки ООО «Аэроприбор», АО «Радий», теоретические работы ГосНИИ ГА, МГТУ ГА, РГГМУ в области повышения достоверности метеорологической информации.

Однако, задача обеспечения достоверности метеорологической информации еще далека от успешного решения. Несмотря на весьма перспективные теоретические исследования и технические разработки по-прежнему остаются до конца не решенными такие задачи как:

- определение пространственных координат радиозонда без пропусков и потери информации, особенно в условиях воздействия радиопомех как естественного, так и искусственного происхождения. Следует отметить важность и актуальность решения данной задачи, т.к. измерения, производимые радиозондом, должны быть привязаны к действительной точке их проведения;

- использование комплексных подходов к синтезу алгоритмов обработки информации о состоянии атмосферы.

Недостаточное внимание уделяется обеспечению достоверности данных радиозондирования с точки зрения использования ее при планировании и производстве полетов ВС, разработке метеопрогнозов по аэродромам и маршрутам полетов ВС ГА.

Целью диссертационной работы является повышение достоверности данных радиозондирования атмосферы за счет повышения точности и помехоустойчивости алгоритмов комплексной обработки информации о положении радиозонда в сложных условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке.

Поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач:

1. Анализ влияния текущей и прогностической метеоинформации на регулярность и безопасность полетов ВС ГА.

2. Обоснование структуры комплексной системы радиозондирования атмосферы. Выбор метода комплексирования метеоинформации.

4. Синтез алгоритмов комплексной первичной обработки информации радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы.

5. Разработка методики и оценка достоверности (точности и помехоустойчивости) данных радиозондирования при использовании разработанных алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

Объектом исследования являются комплексные системы радиозондирования атмосферы.

Предметом исследования являются алгоритмы комплексной первичной обработки метеоинформации в комплексных системах радиозондирования атмосферы.

Методы исследования основываются на положениях марковской теории оценивания случайных процессов, теории вероятностей и математической статистики, теории статистических решений, а также на методах математического моделирования.

Научная новизна работы состоит в развитии теоретических методов марковской теории оценивания случайных процессов применительно к метеорологическому обеспечению полетов. В настоящей работе впервые разработаны:

1. Структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования.

2. Оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации для комплексной системы радиозондирования атмосферы, обеспечивающие высокую достоверность данных радиозондирования атмосферы.

3. Структура модуля комплексной обработки информации, реализующего квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

4. Методика оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования. На основе разработанной методики получены результаты оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма о текущем положении радиозонда и результаты оценки критичности квазиоптимального алгоритма к значению параметров математических моделей погрешностей измерений текущего положения радиозонда.

Практическая значимость работы состоит в том, что внедрение ее результатов в разработку существующих и перспективных систем радиозондирования атмосферы позволят:

- повысить качество предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации на этапах планирования и подготовки к вылету, повысить степень осведомленности экипажей воздушных судов и диспетчеров управления воздушным движением о метеообстановке по маршруту полета;
- использовать предложенную структуру комплексной системы радиозондирования атмосферы для модернизации отечественной аэрологической сети;
- использовать результаты радиозондирования атмосферы для валидации метеоинформации, получаемой от аэродромных источников метеоинформации.

Самостоятельную практическую значимость имеют квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

Достоверность научных результатов основана на:

- детальном анализе влияния на безопасность и регулярность полетов текущей и прогностической метеоинформации, анализе методик расчета риска предстоящего полета и методик расчета потребного запаса топлива, с учетом метеорологических условий по маршруту полета;
- корректном использовании известных теоретических методов марковской теории оценивания случайных процессов, теории вероятностей и математической статистики, теории статистических решений, теории инвариантности, методов математического моделирования;

– на результатах натурных сравнительных исследований радиолокационной и спутниковой систем радиозондирования атмосферы.

На защиту выносятся:

1. Структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования.

2. Оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации для комплексной системы радиозондирования атмосферы, обеспечивающие высокую достоверность данных радиозондирования.

3. Структура модуля комплексной обработки информации, реализующего алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

4. Методика и результаты оценки уровня достоверности текущих данных радиозондирования атмосферы на выходе комплексной системы радиозондирования атмосферы.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и всероссийских конференциях в период 2015-2019 гг., XX заседании ККА МАК в 2019 г., на научно-технических семинарах кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА в 2016-2022 гг.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 18 (117с.) печатных работ, в том числе: 7 (59 с.) научных статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ; 8 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях; получены - 1 патент (рег. №92204, 2010 г.); 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (рег. №2020618441, 2020 г.). Материалы диссертационного исследования отражены в отчёте НИР («Исследование возможности использования алгоритмов комплексной обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS, ГЛОНАСС и

GALILEO в системах радиозондирования атмосферы". Отчет по НИР №АААА-Б18-2180123910041-3, 2017 г.).

Реализация результатов.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Аэроприбор», что подтверждено соответствующим актом. Полученные теоретические результаты работы приняты к использованию в учебном процессе в МГТУ ГА.

Лично автором:

– обоснована необходимость повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы для обеспечения авиационных потребителей качественной метеоинформацией, с учетом сложных природно-географических условий и ухудшенной помеховой обстановки;

– обоснована структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования;

– разработаны оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования, обеспечивающие высокую достоверность информации о пространственном положении радиозонда;

– разработана структура модуля комплексной обработки информации, реализующего квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования;

– разработана методика оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования, проведена оценка точности и помехоустойчивости текущего положения радиозонда.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложений и списка литературы, насчитывающего 173 наименования. Общий объем диссертации составляет 176 стр., включает 55 рисунков, 14 таблиц, 5 приложений на 37 стр.

ГЛАВА 1. ТЕКУЩАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МЕТЕОИНФОРМАЦИЯ, ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И РЕГУЛЯРНОСТЬ ПОЛЕТОВ. РОЛЬ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТЕОИНФОРМАЦИИ

1.1. Анализ влияния на безопасность и регулярность полетов текущей и прогностической метеоинформации

ФАП «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» (ФАП-60) определяет, что метеорологическая информация предоставляется в виде сводок, прогнозов и других сообщений, касающихся наблюдаемых или ожидаемых метеорологических условий [155].

На рис.1.1. приведены источники текущей и прогностической метеоинформации для авиационных потребителей. Организация и порядок наблюдений определяется требованиями к предоставлению метеоинформации, которые изложены в ФАП-60.

Авиационные метеосводки выпускаются в виде:

- метеосводок по аэродрому (METAR) для распространения за пределами аэродрома (рис. 1.2);
- специальных метеосводок (SPECI) (рис. 1.3).

Метеосводки METAR являются текущими и предназначены для распространения за пределами аэродрома. Метеосводки SPECI предназначены для прибывающих и вылетающих ВС и являются местными сводками.

Авиационные метеопрогнозы включают в себя:

- метеопрогнозы по аэродрому (TAF) и метеопрогнозы погоды для посадки (TREND), представленные на рис.1.4;

- метеопрогнозы для взлета;
- зональные метеопрогнозы для полетов на малых высотах (GAMET) (рис. 1.5).

Кроме этого, авиационные метеопрогнозы включают:

- прогнозы возникновения опасных метеоявлениях (ОМЯ) на малых высотах (AIRMET) (рис. 1.6);
- прогнозы возникновения ОМЯ по маршруту полета (SIGMET) (рис. 1.6).

Все перечисленные метеосводки и метеопрогнозы используются для передачи метеоинформации во всех государствах-членах ИКАО.

Как показали результаты анализа причин АП, связанных с метеорологическими условиями (МУ) полета [140] наиболее опасными метеоявлениями являются: кучево-дождевая облачность, туман, ограниченная видимость, ливневые осадки, сильный порывистый ветер, сдвиг ветра, снегопад и метель, дымка, обледенение. Распределение АП по типам ОМЯ приведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.1 - Метеорологическая информация

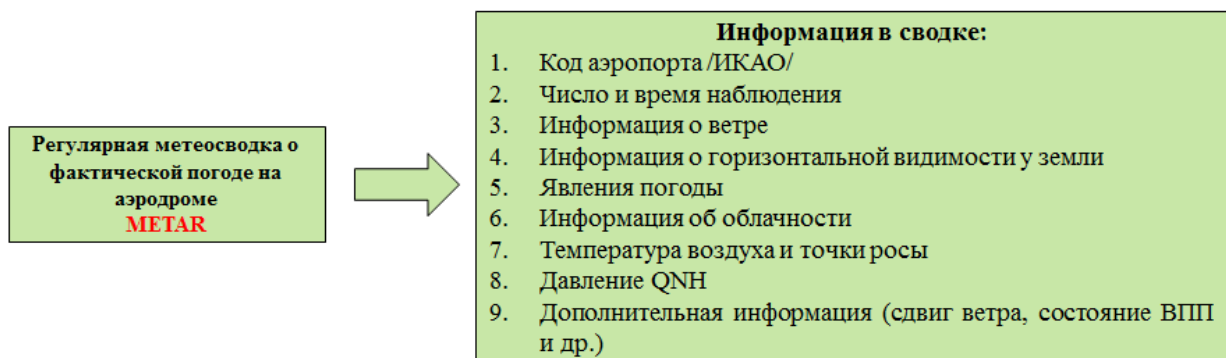


Рисунок 1.2 - Метеосводка METAR

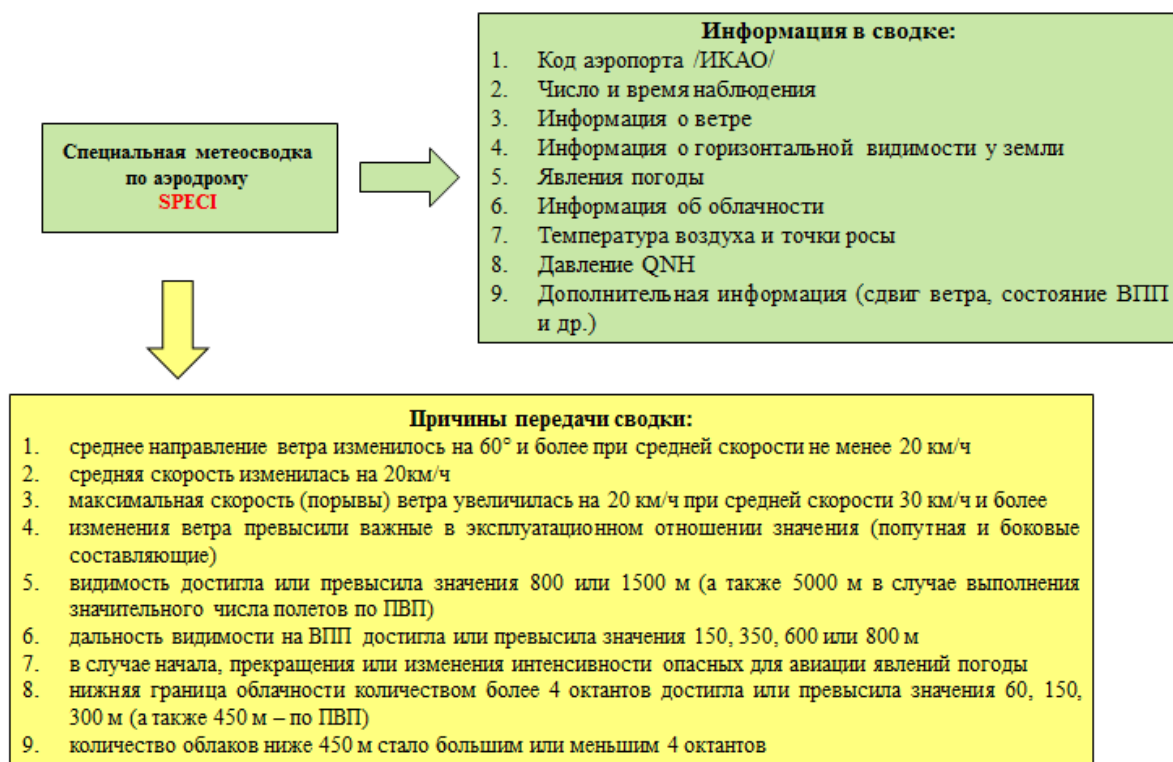


Рисунок 1.3 - Метеосводка SPECI

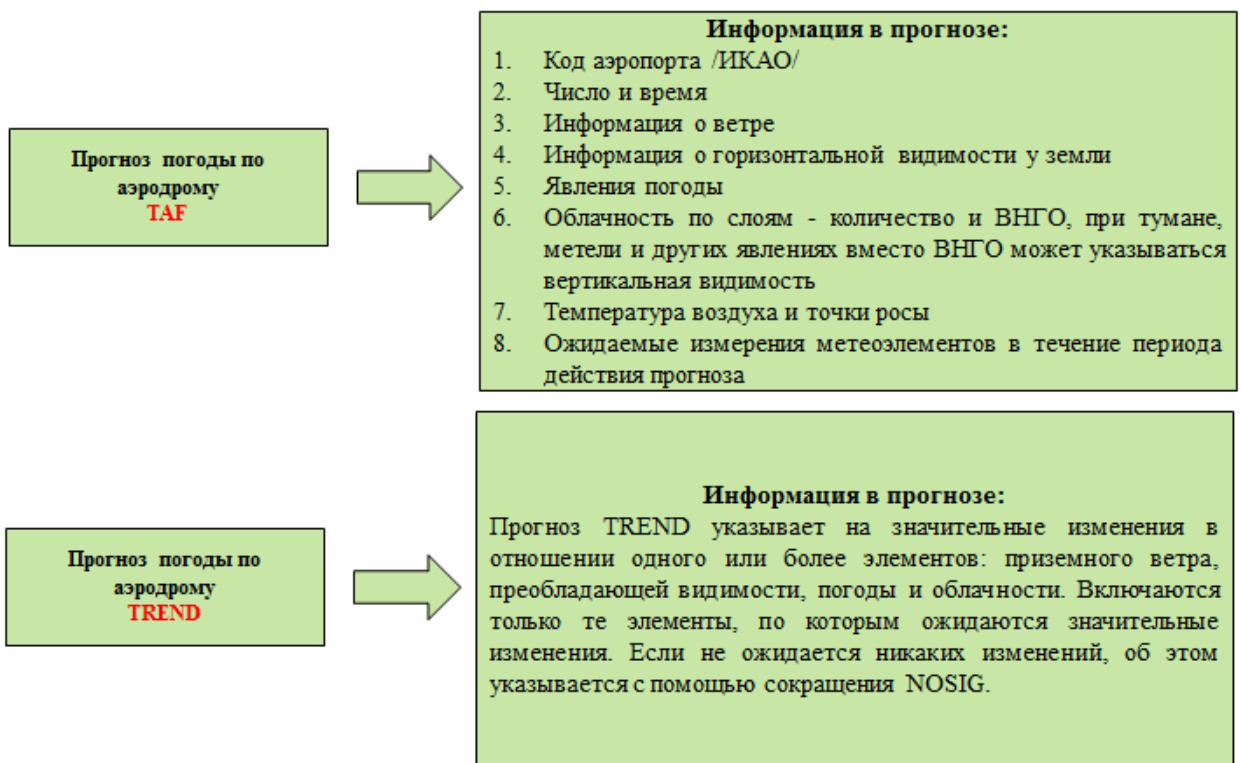


Рисунок 1.4 - Метеопрогнозы по аэродрому

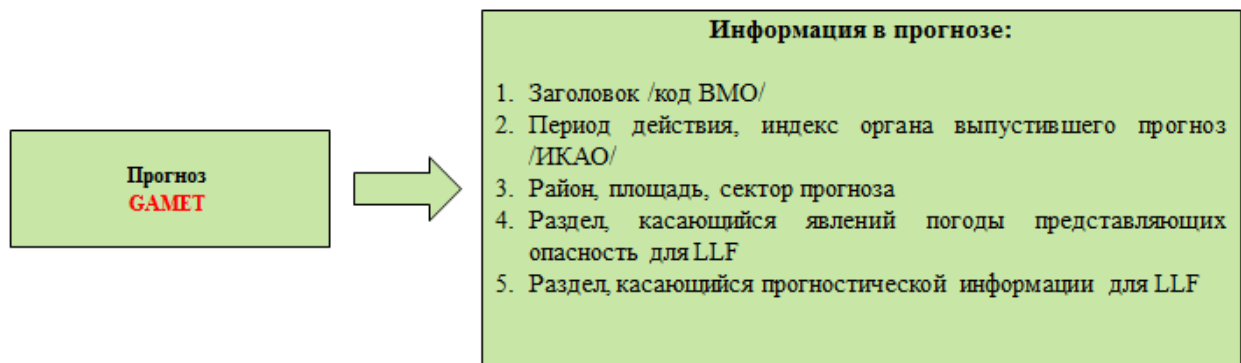


Рисунок 1.5 - Прогноз погоды GAMET

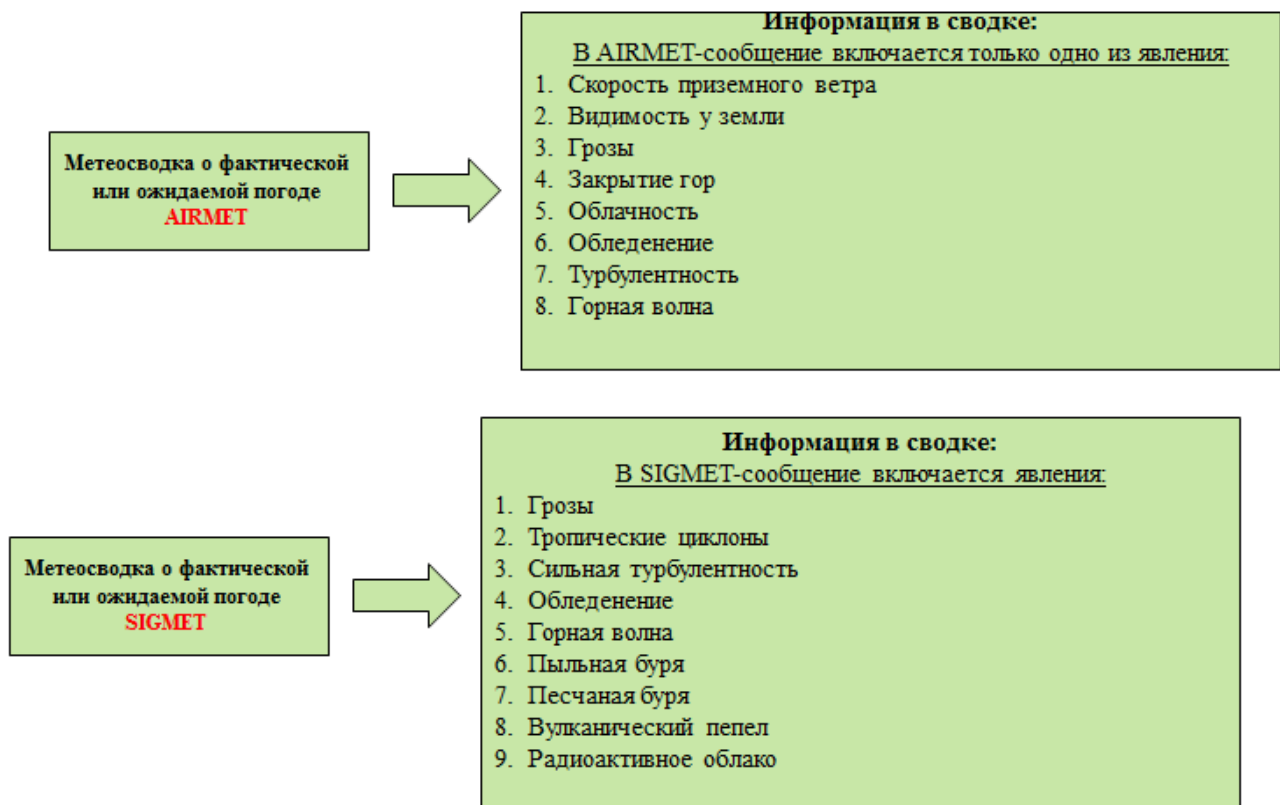


Рисунок 1.6 - Метеосводки по маршруту полета

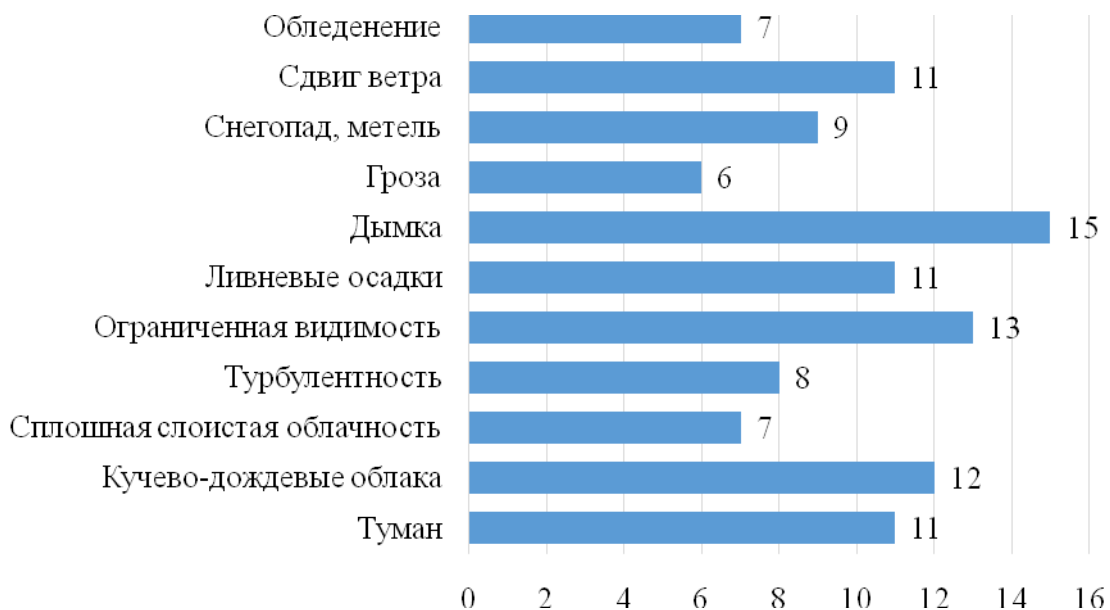


Рисунок 1.7. Распределение АП по типам ОМЯ

Проведенный в [43] факторный анализ безопасности полетов показал, что по причинам недостатков в метеообеспечении полетов (МО) происходят до 9% АП (см. рис.1.8).

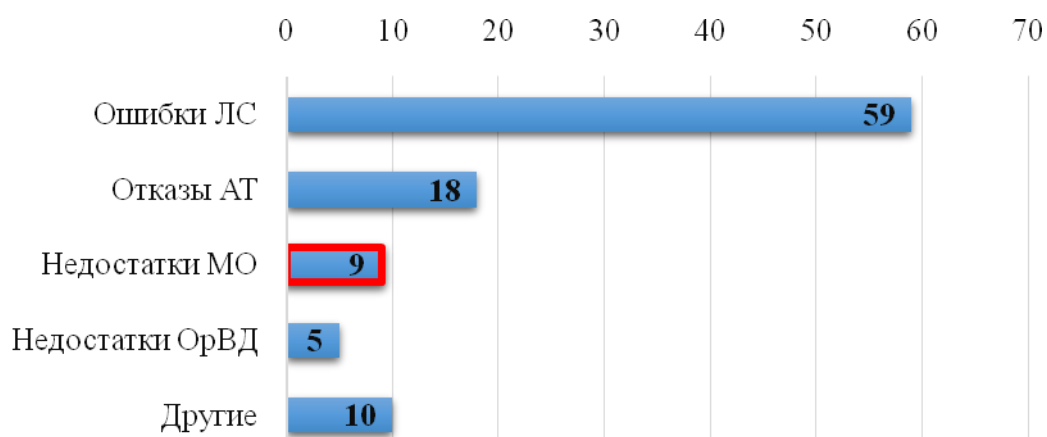


Рисунок 1.8 – Факторный анализ АП

Недостатки в метеобеспечении (МО) проявляются в низкой оправдываемости метеопрогнозов, недостоверных метеосводках о фактической погоде и опасных метеоявлениях (ОМЯ). На рис.1.9 приведены данные о влиянии недостатков МО на безопасность полетов.

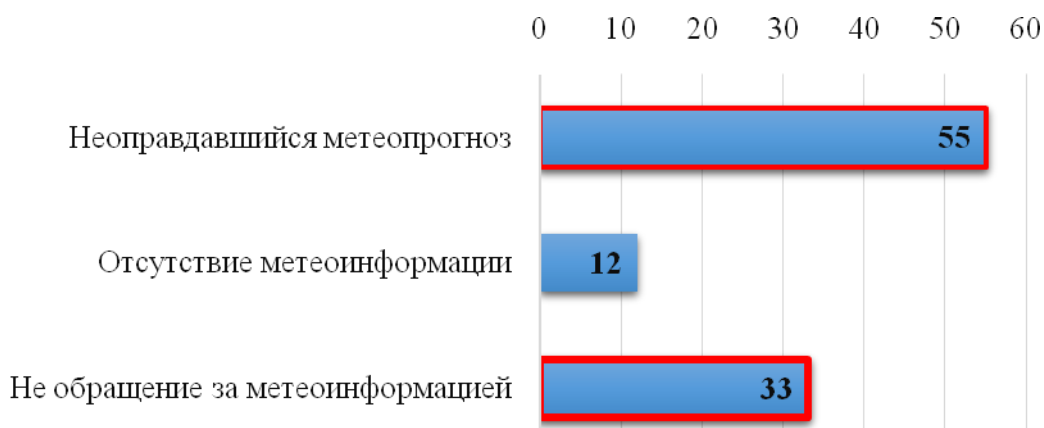


Рисунок 1.9. Влияние недостатков МО на безопасность полетов

Видно, что более половины АП связаны с неоправдавшимся метеопрогнозом (55%), а более чем в трети АП (33%) экипаж за метеоинформацией не обращался, что может свидетельствовать, в том числе и о низком доверии экипажей ВС к достоверности метеоинформации.

Кроме этого, отсутствие достоверной метеоинформации подчас является причиной авиационных катастроф. Приведем пример двух наиболее характерных авиационных катастроф, когда отсутствие достоверной метеоинформации приводило к трагическим последствиям.

Самолет Ту-154М выполнял заход на посадку на аэродром Иркутск (2001 г.). На высоте 900 м Ту-154М потерял управление и упал на землю. Члены экипажа ВС и пассажиры погибли. Расследование катастрофы показало, что при развороте на глиссаду пилот не справился с управлением. Все необходимые сводки фактической погоды на аэродроме Иркутск и метеопрогнозы были приобщены к делу. Проведенный позднее более детальный анализ этой катастрофы показал, что на высоте 900 м Ту-154М при развороте на глиссаду пересек фронтальную поверхность мощного холодного фронта, который прошел Иркутск. Пересекая холодный фронт Ту-154М попал в мощное струйное течение низкого уровня со скоростью на оси 20...25 м/с (рис.1.10). Экипаж в таких условиях был практически не в состоянии справиться с управлением самолетом. Очевидно, что ни экипаж ВС, ни диспетчер УВД были не осведомлены о фактических МУ, что и привело к катастрофе.

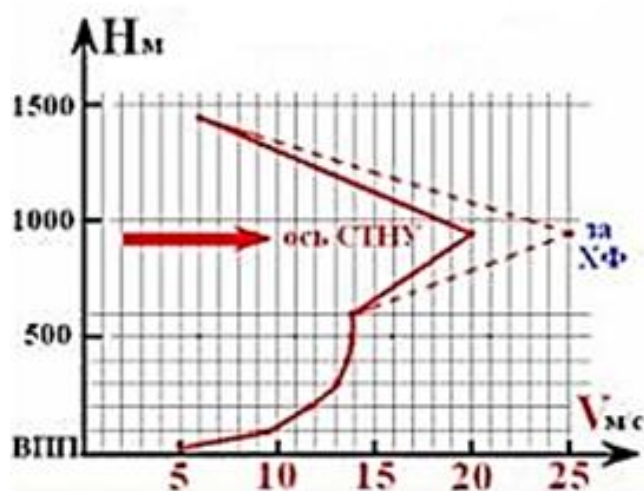


Рисунок 1.10. Расчетный профиль ветра в районе катастрофы

Другим примером может служить авиакатастрофа в районе г. Донецка в

2006 г. Полет самолета Ту-154 проходил в верхней части мощных кучево-дождевых облаков (Cb) на высоте 11860 м. Как установило расследование катастрофы произошел резкий «подброс» самолета на 900 м вверх, и затем последующее сваливание в штопор и падение на землю. Члены экипажа и пассажиры погибли. Перед вылетом из аэропорта Анапа экипажу была доведена метеоинформация, в которой содержалось предупреждение о облачности Cb на маршруте, высоте верхней границы облаков (ВГО) – 8000 м, с прогнозом ее развития до 12000 м. Проведенная экспертиза показала, что экипаж ВС предпринял попытку обхода грозового облака «верхом», что запрещалось действующими на тот момент документами (НПП ГА и НМО ГА) и запрещено сейчас. Однако, экипаж принимал решение с учетом данных метеопрогноза, а фактически на момент катастрофы в данном районе наблюдалась суперячейковая конвекция в верхней части сверхмощного Cb, «пробившего» тропопаузу, а высота верхней границы облаков превысила 14000 м. Осталось не выясненным:

- располагал ли экипаж ВС оперативной метеоинформацией о фактической метеообстановке по маршруту полёта;
- был ли осведомлен диспетчер УВД о появлении на маршруте полета ВС суперячейковых Cb со сверхвысокими ВГО.

Рассмотренные выше катастрофы можно было бы предотвратить, в случае наличия у экипажа ВС и диспетчера УВД достоверной метеоинформации о метеообстановке по маршруту полета ВС.

Как показывают статистические данные причиной 8,9% задержанных авиарейсов (см. рис.1.11) является неопределенность погоды на маршруте (т.е., по сути, отсутствие достоверных данных метеонаблюдений) [43]. Задержки авиарейсов приводят к нарушению регулярности полетов. Кроме этого, по официальным данным ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», по причине неоправдавшихся метеопрогнозов совершают вынужденные посадки десятки ВС (см. рис. 1.12).

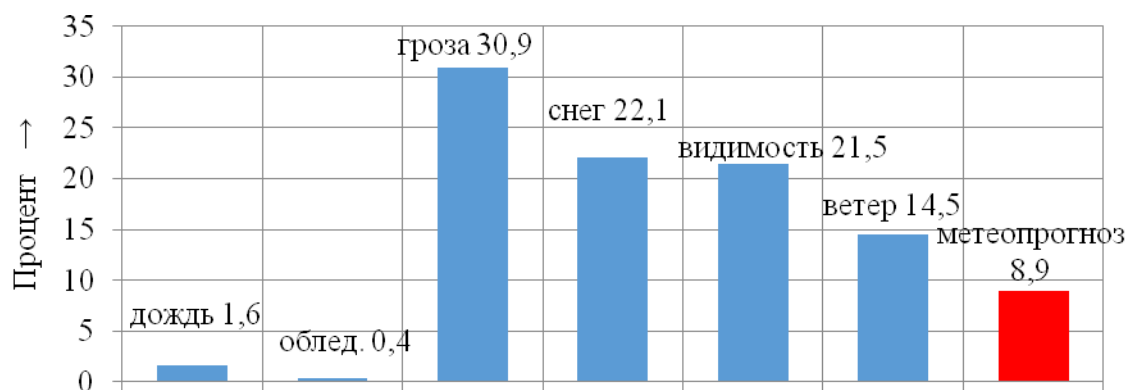


Рисунок 1.11 – Результаты анализа нарушений регулярности полетов ВС по метеоусловиям

В ряде работ, в частности в [43, 96,97], проводился анализ регулярности полетов, в котором показано, что данные о причинах задержек авиарейсов, связанных с недостатками в МО, практически отсутствуют и их влияние на регулярность полетов можно оценить только косвенно.

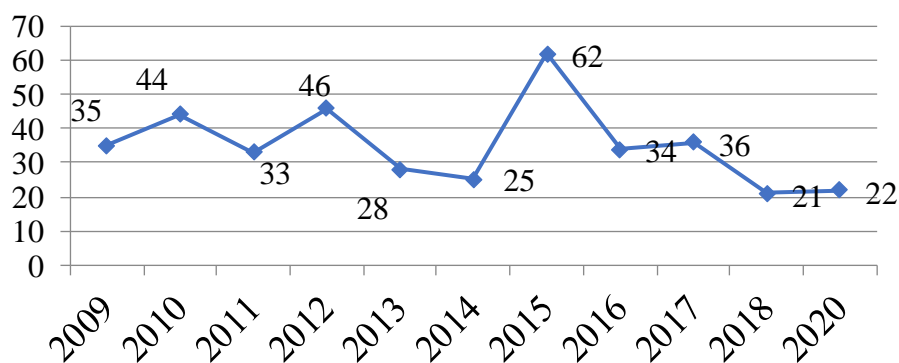


Рисунок 1.12 – Число вынужденных посадок ВС по неоправдавшимся метеопрогнозам

Последствия нарушений регулярности полетов могут быть существенными. В частности:

- для авиакомпаний задержки авиарейсов, посадки на запасные аэродромы грозят немалыми финансовыми потерями и репутационным рисками;

- для аэропортов нарушается или усложняется процесс подготовки ВС к вылету и прием прибывающих ВС;

- для пассажиров очевидны моральные и материальные издержки.

Уровень безопасности полетов может быть оценен различными показателями, подробное описание которых приведено в [73-75]. Однако, с точки зрения влияния МУ и качества МО на конкретный полет, в наибольшей степени подходят вероятностные показатели, в частности, вероятность благополучного завершения полета ВС $P_{БП}$, под которой понимается вероятность события, заключающегося в отправлении ВС с аэродрома вылета и успешном завершении полета на аэродроме назначения или запасном аэродроме. При этом вероятность благополучного завершения полета ВС $P_{БП}$ характеризует некоторый уровень безопасности полетов.

Будем рассматривать зависимость $P_{БП}$, от качества МО и фактических МУ полета:

$$P_{БП} = f(\mathbf{K}_{МО}, \mathbf{E}_{МУ}, t_{пол}), \quad (1.1)$$

где: $\mathbf{K}_{МО}$ - вектор качества МО, $\mathbf{E}_{МУ}$ - вектор, характеризующий фактические МУ полета ВС, с учетом МУ на маршрутах полета до запасных аэродромов и МУ запасных аэродромов; $t_{пол}$ – время полета.

Вектор качества МО $\mathbf{K}_{МО}$, входящий в (1.1), зависит от вектора технических характеристик средств проведения метеорологических измерений и наблюдений $\mathbf{Y}_{СИН}$, квалификации метеорологов \mathbf{Q}_M , принятых методик прогнозирования погоды и ОМЯ \mathbf{MP}_M и прогностической метеоинформации, поступающей по каналам АСПД Росгидромета, \mathbf{I} :

$$\mathbf{K}_{МО} = f(\mathbf{Y}_{СИН}, \mathbf{Q}_M, \mathbf{MP}_M, \mathbf{I}). \quad (1.2)$$

Прогностическая метеоинформация от Росгидромета, зависит от:

- данных радиозондирования атмосферы $\mathbf{I}_{PЗ}$;
- метеоинформации от сети метеолокаторов $\mathbf{I}_{MPЛ}$;
- метеоинформации от сети наземных метеостанций $\mathbf{I}_{МС}$;
- данных спутниковой метеорологической сети $\mathbf{I}_{СС}$.

Тогда можно записать:

$$\mathbf{I} = (\mathbf{I}_{PЗ}, \mathbf{I}_{MPЛ}, \mathbf{I}_{МС}, \mathbf{I}_{СС}). \quad (1.3)$$

В результате показатель $P_{БП}$ может быть записан в виде:

$$P_{БП} = f(\mathbf{Y}_{СИН}, \mathbf{Q}_M, \mathbf{MP}_M, \mathbf{I}, \mathbf{E}_{МУ}, t_{пол}). \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) позволяет установить взаимосвязь между вероятностью благополучного завершения полета и влияющими на это событие факторами. Однако, для проведения конкретных расчетов выражение (1.4) не подходит. Несмотря на простоту формулировки, вероятность $P_{БП}$ является сложной функцией, а определение ее в строго формализованном виде – основная проблема в теории безопасности полетов.

Аналогично можно ввести в рассмотрение показатель, характеризующий уровень регулярности полетов. Под показателем, характеризующим уровень безопасности полетов, будем понимать вероятность $P_{РП}$ отправления и прибытия ВС в установленный расписанием (или договором) интервал времени в аэропорт назначения. По аналогии можно записать:

$$P_{РП} = f(\mathbf{Y}_{СИН}, \mathbf{Q}_M, \mathbf{MP}_M, \mathbf{I}, \tilde{\mathbf{E}}_{МУ}, t_{пол}), \quad (1.5)$$

где: $\tilde{\mathbf{E}}_{МУ}$ - вектор, характеризующий фактические МУ на расчетном маршруте полета ВС.

Очевидно, что определение вероятности P_{PI} в строго формализованном виде такая же сложная задача, как и для P_{BP} .

Выражения (1.4) и (1.5) позволяют сделать важный вывод - достоверность метеоинформации является одним из определяющих факторов успешного завершения полета.

Под достоверностью метеоинформации D_{MI} в дальнейшем будем понимать степень соответствия между метеоинформацией, содержащейся в метеопрогнозах, метеосводках, прогностической информации от Росгидромета и фактической метеообстановкой на аэродромах и маршрутах полетов ВС.

Исходя из введенного определения можно утверждать, что достоверность метеоинформации зависит от:

- точности измерений метеопараметров атмосферы I_{MI} ,
- качества используемых методов прогнозирования метеопараметров атмосферы и ОМЯ I_{MP} ,
- условий эксплуатации метеоизмерителей $I_{\text{Э}}$.

Тогда можно записать:

$$D_{MI} = f(I_{MI}, I_{MP}, I_{\text{Э}}). \quad (1.6)$$

Из (1.6) очевидно, что в конечном итоге достоверность метеоинформации для авиационных потребителей зависит от условий эксплуатации систем радиозондирования атмосферы и помеховой обстановки в районе радиозондирования.

1.2. Оценка риска предстоящего полета с учетом достоверности метеорологической информации

В п.1.1 были рассмотрены вероятностные показатели, характеризующие уровень безопасности и регулярности предстоящего полета. Практическое использование таких показателей сталкивается с рядом трудностей, а именно:

- сложность проведения расчетов значений показателя применительно к конкретному полету, вследствие сложности формализации функции, описывающей взаимосвязь показателя и факторов, от которых зависят его значения;

- определение граничных значений показателя, когда полет признается безопасным или когда требуется проведение определенных мероприятий для повышения уровня безопасности полета, вплоть до его отмены.

От таких трудностей свободны методики, основанные на оценке уровня риска предстоящего полета. В [140] приводится анализ трех методик оценки риска предстоящего полета:

- матрица оценки рисков ИКАО;
- методика CFIT;
- методика FRAT.

Матрица рисков ИКАО позволяет оценивать риски отдельных событий (обледенение, боковой ветер и др.), но не может быть использована для оценки риска ОМЯ на протяжении всего полета ВС.

Методика CFIT ограничивается оценкой неблагоприятных МУ на этапе захода на посадку и посадки.

Методика FRAT (Flight Risk Assessment Tool) позволяет определить риск предстоящего полета и выявить факторы наибольшей опасности. Данная методика является наиболее приемлемой для оценки риска предстоящего полета по факторам МУ и МО.

Описание методики FRAT приведено в Приложении А.

Анализ приведенных в таблице А.2 факторов опасности показал, что вторая категория факторов опасности методики FRAT включает в себя факторы опасности, связанные с МУ R_{MV} и факторы опасности, связанные с качеством МО полетов R_{MO} . Значение суммарного риска категории «Условия эксплуатации ВС» (категория 2) определяется выражением:

$$R_{VЭ} = \tilde{R} + R_{MV} + R_{MO}, \quad (1.7)$$

где: \tilde{R} – суммарное значение факторов опасности во второй категории без учета факторов МУ и МО.

Факторы опасности, характеризующие МУ полета достаточно полно учтены в методике, их суммарное значение $\sum R_{MV} = 47$. Факторы опасности, характеризующие качество МО полетов, учитывают только:

- отсутствие метеоинформации по аэродрому назначения или по маршруту полета (п.26 в табл.А.2) [140];
- наличие в течение года хотя бы одного случая неоправданного прогноза погоды (п.38 в табл.А.2) [140];
- наличие в течение года хотя бы одного случая несвоевременного информирования об изменениях погоды по данному маршруту (п.39 в табл.А.2) [140].

Рассмотрим эти факторы опасности подробнее.

Фактор опасности (п.26), связанный с отсутствием метеоинформации по аэродрому назначения или по маршруту полета свидетельствует либо о полном отсутствии МО, либо о том, что экипаж ВС не обращался за метеоинформацией. Однако факт того, что экипаж ВС за метеоинформацией не обращался, как правило, становится известным в случае АП уже в процессе расследования. Выявить фактор опасности, связанный с не обращением экипажа за метеоинформацией на этапе подготовки к вылету затруднительно. Связано это с тем, что в соответствии с ФАП-128 экипажи ВС за метеоинформацией могут

обращаться к официальным метеопровайдерам (ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета») или к альтернативным источникам метеоинформации, которые экипаж сочтет достоверными. Вместе с тем, этот фактор опасности («не обращение экипажа за метеоинформацией») должен быть включен в категорию «Условия полета» и разработаны мероприятия по контролю за наличием у экипажей необходимой метеоинформации на предстоящий полет.

Фактор опасности (п.38), определяемый наличием неоправданного метеопрогноза для существующей системы МО является весьма актуальным. Как показано в [43], практически на всех аэродромах хотя раз в год регистрируются неоправданные прогнозы. Причинами являются не только ошибки в прогнозировании погоды и ОМЯ, но и банальные ошибки при составлении метеосводок. Как показывают отчеты ФГБУ «Авиаметтелеком» только за сентябрь-октябрь 2017 года по ряду аэродромов количество ошибок в метеосводках превысило 120! Причем наблюдались грубые ошибки, полностью меняющие картину метеообстановки на аэродроме.

С другой стороны, оценка оправдываемости метеопрогнозов в соответствии с инструкцией Росгидромета является явно завышенной [43] и, кроме этого, синоптик аэродромной метеослужбы в определенных ситуациях может давать «перестраховочный» прогноз. Например, в прогнозе могут быть необоснованно указаны сильные (ливневые) дожди, грозы и другие ОМЯ. Тогда оценка риска предстоящего полета $R_{пол}$ будет явно завышенной и не соответствовать реальным МУ на аэродроме или маршруте полета. Такие аэродромы как Сыктывкар, Бегишево, Улан-Удэ являются «лидерами» по числу «перестраховочных» прогнозов по скорости ветра и ВНГО в течение года [1,5].

Фактор опасности (п.39), определяемый наличием несвоевременного информирования об изменениях погоды по данному маршруту, практически целиком определяется прогностической информацией, разработанной по данным радиозондирования атмосферы. Учет этого фактора крайне необходим. Как показано в п.1.1 катастрофа Ту-154 в районе Донецка произошла именно по причине несвоевременного информирования экипажа об изменениях погоды по

маршруту полета. Данный фактор опасности, по сути, связан с ситуационной осведомленностью экипажа ВС об изменениях погоды на маршруте полета. В методике не учитывается ситуационная осведомленность диспетчера УВД об изменениях погоды на маршруте полета, в то время как учет этого фактора опасности крайне важен.

Кроме этого, в категории «Оборудование ВС» отсутствует фактор опасности, связанный с наличием или отсутствием на борту ВС метеолокатора, являющегося автономным датчиком, обеспечивающим экипаж информацией о ОМЯ по курсу полета ВС.

Анализ методики FRAT позволяет сделать ряд важных выводов.

1. Методика оценки риска предстоящего полета позволяет оценивать риск и своевременно выявлять факторы опасности, вносящие наибольший вклад в уровень риска предстоящего полета, проводить мероприятия по уменьшению риска и, следовательно, повышать уровень безопасности полетов.

2. Методика применима только для случая, когда текущая и прогностическая метеоинформация полностью достоверна. В связи с этим неизбежны ошибки в оценке риска предстоящего полета, обусловленные ошибками измерения метеопараметров атмосферы, помеховой обстановкой в районе проведения метеонаблюдений, ошибками в метеопрогнозах.

3. Требуется дополнить перечень факторов опасности, обусловленных МО полетов, следующими факторами:

- «наличие в течение года хотя бы одного случая неоправданного прогноза ОМЯ»;

- «наличие в течение года хотя бы одного случая неоправданного прогноза по одному или нескольким метеопараметрам атмосферы (температура, ветер, ВНГО и др.)»;

- «не обращение экипажа за метеоинформацией»;

- «наличие в течение года хотя бы одного случая несвоевременного информирования экипажа ВС об изменениях погоды по данному маршруту»;

- «наличие в течение года хотя бы одного случая несвоевременного информирования диспетчера УВД об изменениях погоды по данному маршруту»;
- «отсутствие на борту ВС метеолокатора».

В таблице 1.1 приведены дополнительные факторы опасности, обусловленные качеством МО полетов.

Таблица 1.1. Дополнительные факторы опасности для расчета риска предстоящего полета по методике FRAT

№	Фактор опасности	Показатель уровня риска	Фактический уровень риска
Категория 2. Условия эксплуатации			
1	Не обращение экипажа за метеоинформацией	5	
2	Наличие в течение года хотя бы одного случая неоправданного прогноза ОМЯ	4	
3	Наличие в течение года хотя бы одного случая неоправданного прогноза по одному или нескольким метеопараметрам атмосферы (температура, ветер, ВНГО и др.)	3	
4	Наличие в течение года хотя бы одного случая несвоевременного информирования экипажа ВС об изменениях погоды по данному маршруту	3	
5	Наличие в течение года хотя бы одного случая несвоевременного информирования диспетчера УВД об изменениях погоды по данному маршруту	2	
Категория 3. Оборудование ВС			
6	Отсутствие на борту ВС метеолокатора	2	

Используя методику FRAT, определим новые пороговые уровни для табл. А.3. Максимальное количество баллов в исходной методике $R_{пол. max} = 178$ (см.табл.А.2). Исходное пороговое значение желтого уровня $R_{yel} = 24$, исходное пороговое значение красного уровня $R_{red} = 30$.

Определим отношения уровней к максимальному значению риска:

$$K_{yel} = \frac{R_{пол. max}}{R_{yel}} = 7,42;$$

$$K_{red} = \frac{R_{пол. max}}{R_{red}} = 5,93.$$

Сумма добавленных баллов равна $\Delta R = 19$. Максимальное количество баллов $R_{пол. max} = 197$. Новые значения пороговых уровней в обновленной методике рассчитываются по формулам:

$$R_{yel} = \frac{R_{пол. max}}{K_{yel}} = 26;$$

$$R_{red} = \frac{R_{пол. max}}{K_{red}} = 33.$$

Для апробации усовершенствованной методики оценки риска предстоящего полета проведен анализ АП за 2020-2021 гг. связанных с МУ полета и МО полетов с самолетами и вертолетами в РФ. Использовались отчеты об АП представленные на официальном сайте ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» [1]. Результаты расчетов показали, что значительная часть полетов ВС, которые закончились АП по причине МУ и МО получила высокие значения риска ($R_{пол} > R_{red}$).

Таким образом, методика FRAT позволяет учесть факторы опасности, обусловленные МУ полета и МО полета и оценить риск предстоящего полета. На базе данной методики можно разработать методику, позволяющую оценить риск предстоящего полета, например, только по факторам МО и на основании ее сравнить качество МО полетов на различных аэродромах и для различных маршрутов полета.

Вместе с тем, существуют факторы опасности, которые трудно учесть в данной методике. К таким факторам относится, в частности, ошибка в

определении потребного запаса авиационного топлива (ПЗАТ). Расчет ПЗАТ производится на основании метеопрогноза на предстоящий полет. Очевидно, что недостоверная метеоинформация (метеопрогноз, метеосводка, предупреждение и т.п.) может привести, как минимум, к следующим исходам:

- значение ПЗАТ будет меньше фактически необходимого. Это приведет к тому, что ВС будет вынуждено совершить посадку на одном из запасных аэродромов;

- значение ПЗАТ будет меньше фактически необходимого, ВС истратит весь запас топлива еще до подлета к аэродрому назначения или запасному аэродрому, что чревато серьезным АП, вплоть до катастрофы;

- значение ПЗАТ будет больше фактически необходимого. Это приведет к тому, что допустимая коммерческая нагрузка будет меньше и, следовательно, ВС будет загружено не полностью.

Сложность учета фактора опасности, связанного с расчетом ПЗАТ заключается в том, что ошибка в расчетах проявляется уже в полете или после его завершения.

1.3. Расчет потребного запаса топлива на предстоящий полет с учетом текущих и прогнозируемых метеорологических условий на маршруте полета

Проведем анализ методик расчета потребного запаса авиационного топлива (ПЗАТ), с учетом фактических метеорологических условий на маршруте полета и покажем степень влияния ошибок в метеоданных на расчет ПЗАТ.

Общий расчет полета ВС включает в себя определение [137]:

- ПЗАТ и допустимой коммерческой нагрузки;

- максимально допустимой взлетной и посадочной массы ВС;
- массы ВС, дальности, времени и расхода авиационного топлива (АТ) по этапам полета и др.

Для проведения корректных расчетов требуется [21,137]:

- давление, температура, скорость и направление ветра на аэродроме вылета и аэродроме посадки;
- распределение ветра и температуры по высотам полета на маршруте;
- дальность полета до аэродрома назначения и запасных аэродромов;
- состояние поверхности ВПП, видимость на ВПП и др.

Таким образом, на этапе подготовки ВС к полету проводится расчет ПЗАТ и определяется допустимая коммерческая нагрузка ВС, значение которых напрямую зависит от МУ аэродрома и, что наиболее важно, от МУ маршрута полета.

Анализ методики определения ПЗАТ и расчета допустимой коммерческой нагрузки (ДКН) проведем на примере Ил-96-300 [137]. Составляющие ПЗАТ приведены на рис.1.13. ПЗАТ включает в себя АТ, расходуемое на земле (на запуск двигателя (350 кг) и руление на земле из расчета расхода 70 кг в минуту), основной запас авиационного топлива (ОЗАТ) и аэронавигационный запас топлива (АНЗ). ОЗАТ включает в себя АТ требуемое на:

- взлет и разгон до скорости набора высоты;
- полет по маршруту;
- заход на посадку и посадку (1000 кг).

АНЗ топлива включает в себя компенсационный запас авиационного топлива (КЗАТ), составляющий, 3% от ОЗАТ и резервный запас АТ (РЗАТ), необходимый для:

- полета на запасной аэродром;
- полета в зоне ожидания на высоте круга в течение 30 минут.

ПЗАТ и ДКН определяется по таблицам, приведенным в РЛЭ ВС. В таблицах приведены зависимости суммарной массы коммерческой нагрузки и АНЗ в зависимости от дальности до аэродрома назначения. Кроме этого, используются номограммы, представляющие собой зависимости РЗАТ от

дальности и высоты полета на запасной аэродром с учетом ветра и времени полета в зоне ожидания. Данные таблиц и номограмм учитывают также реальную температуру воздуха на маршруте полета ВС.

Расчет ПЗАТ и допустимой коммерческой нагрузки (ДКН) может производиться в двух вариантах.

Расчет по варианту 1 производится, если потребная масса коммерческой нагрузки меньше ДКН или ограничивается максимальной допустимой посадочной массой ВС. В этом варианте известна посадочная масса ВС и расчет ведется от посадки, т.е. в обратном порядке.

Расчет по варианту 2 производится, если потребная коммерческая нагрузка ограничивается максимальной или максимально допустимой взлетной массой. Расчеты в этом варианте ведутся по этапам полета в порядке их выполнения.

Рассмотрим каждый из вариантов более подробно.

Порядок расчетов по варианту 1. По максимально допустимой посадочной массе $m_{нос.маx}$ устанавливается посадочная масса ВС $m_{нос}$ для проведения расчетов:

$$m_{нос} = m_{нос.маx} \cdot \quad (1.8)$$

Масса ВС в конце снижения определяется по формуле:

$$m_{сн} = m_{нос} + 1000[кг]. \quad (1.9)$$

По таблицам, приведенным в РЛЭ, определяются дальность $L_{сн}$, время $t_{сн}$ и расход АТ на снижении с учетом высоты эшелона. В полученное значение дальности $L_{сн}$, вносится поправка на ветер:

$$\Delta L_{сн} = \frac{1}{60} U t_{сн}, \quad (1.10)$$

где: U – прогнозируемая скорость ветра.

Значение поправки $\Delta L_{сн}$ берется со знаком «+» при попутном ветре и знаком «-» при встречном.

Масса ВС в конце каждого участка маршрутного полета $m_{к.мн}$ определяется по результатам расчета предыдущего участка, т.е. снижения и смены эшелона. Масса ВС в начале каждого участка маршрутного полета (кроме начального $m_{н.мн}$) определяется при выборе эшелона крейсерского полета в соответствии с РЛЭ. Расход топлива на участке маршрутного полета вычисляется по формуле:

$$m_{т.мн} = m_{н.мн} - m_{к.мн}. \quad (1.11)$$

Дальность $L_{мн}$ и время $t_{мн}$ на участке маршрутного полета определяется по формулам:

$$L_{мн} = m_{т.мн} q_{ср}^{-1} \frac{V \pm U}{V}, \quad (1.12)$$

$$t_{мн} = \frac{L_{мн}}{V \pm U}, \quad (1.13)$$

где: V – истинная скорость полета ВС; $q_{ср}$ - средняя удельная дальность на участке маршрутного полета, определяемая по таблицам удельных дальностей в РЛЭ ВС.

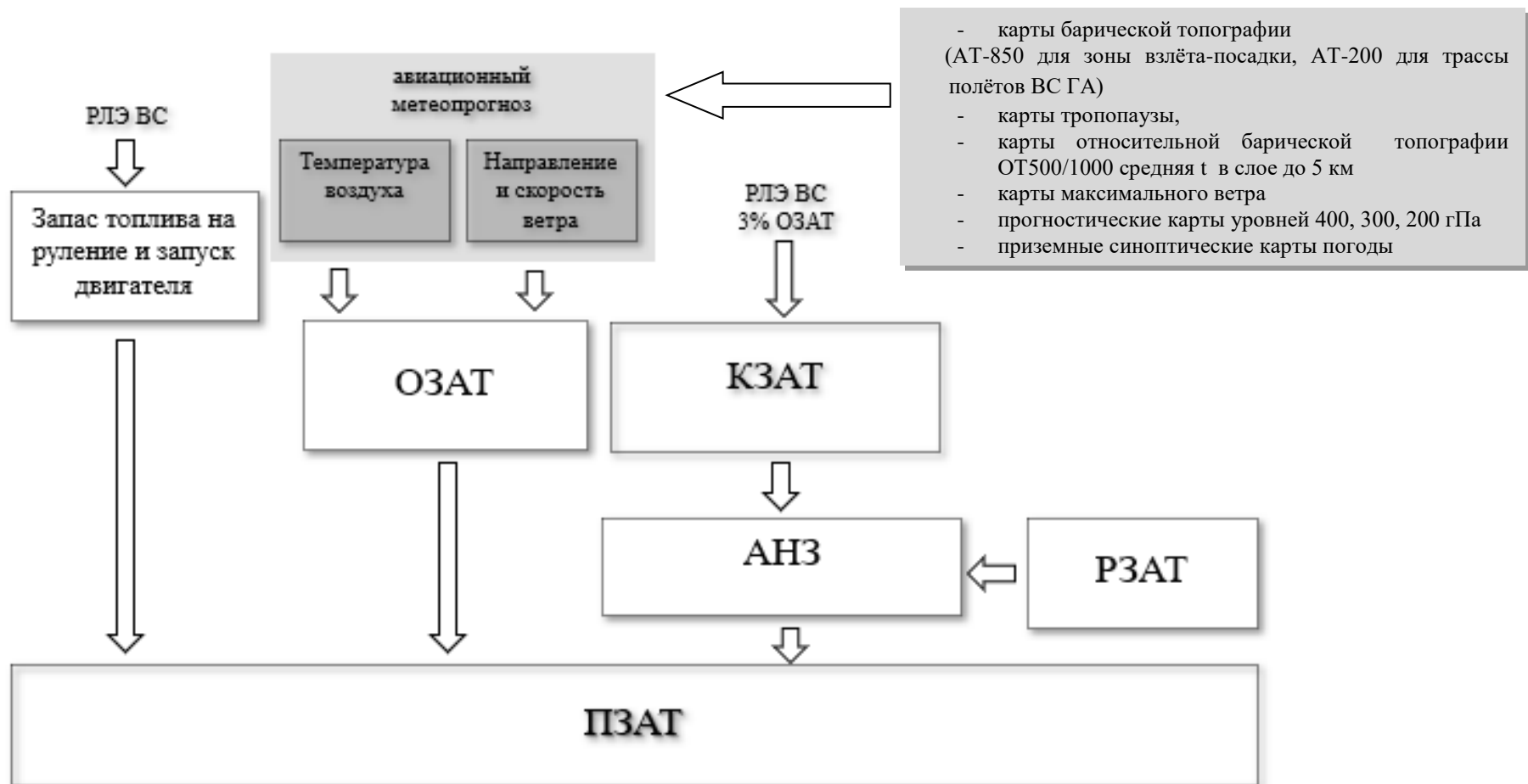


Рисунок.1.13 Схема определения ПЗАТ для самолета Ил-96-300

Дальность $L_{наб}$, время $t_{наб}$ и расход топлива $m_{наб}$ на участке смены эшелонов определяется по таблицам характеристик набора высоты для соответствующего значения массы ВС и высоты исходного и последующего эшелонов с учетом прогноза температуры воздуха. В дальность набора высоты вносится поправка на ветер:

$$\Delta L_{наб} = \frac{U}{V} L_{наб}. \quad (1.14)$$

Расчетная дальность на начальном участке маршрутного полета определяется как:

$$\tilde{L}_{mn} = (L_{аэр} - \Sigma_{уч}) - 200[\text{км}], \quad (1.15)$$

где: $\Sigma_{уч}$ – сумма дальностей всех ранее рассчитанных участков маршрутного полета, включая снижение и смену эшелонов; $L_{аэр}$ – дальность до аэродрома назначения; 200 км – ориентировочная дальность при наборе высоты.

Масса АТ в начале начального участка и расход АТ на этом участке определяется с использованием таблиц удельных дальностей в два приема:

$$m_{m..mn}^* = \frac{\tilde{L}}{q_{mn}^{-1}} \cdot \frac{V}{V \pm U}, \quad (1.16)$$

$$m_{н..mn}^* = m_{к..mn}^* + m_{m..mn}^*. \quad (1.17)$$

Далее вычисляются:

$$\tilde{m}_{m..mn} = \frac{L_{mn}}{q_{ср}^{-1}} \cdot \frac{V}{V \pm U}, \quad (1.18)$$

$$\tilde{m}_{н.мп} = m_{к.мп} + \tilde{m}_{т.мп}. \quad (1.19)$$

Расход АТ при наборе высоты и масса ВС в начале набора высоты определяется по формулам:

$$m_{н.наб}^* = \tilde{m}_{н.мп} + 4000 [кг], \quad (1.20)$$

$$\tilde{m}_{н.наб} = \tilde{m}_{н.мп} + m_{т.наб}^*, \quad (1.21)$$

где: 4000 кг – ориентировочный расход топлива при наборе высоты.

Дальность $L_{наб}$ и время $t_{наб}$ при наборе высоты определяются на основании выполненных расчетов по таблицам РЛЭ ВС. В полученное значение дальности вносится поправка на ветер:

$$\Delta L_{наб} = \frac{1}{60} U t_{наб}. \quad (1.22)$$

Дальность на начальном участке маршрутного полета определяется формулой:

$$L_{мп} = \tilde{L}_{мп} + 200 - L_{наб}. \quad (1.23)$$

Масса ВС в начале начального участка маршрутного полета и расход АТ на начальном участке определяется формулами:

$$m_{т.наб} = \tilde{m}_{т.мп} + \Delta m_{т.мп}, \quad (1.24)$$

$$m_{н.мп} = \tilde{m}_{н.мп} + \Delta m_{т.мп}, \quad (1.25)$$

где: $\Delta m_{т.мп}$ - поправка, обусловленная ветром и вычисляемая по формуле:

$$\Delta m_{m..mn} = \frac{\tilde{L}_{mn} - L_{mn}}{q_{mn}^{-1}} \cdot \frac{V}{V \pm U}. \quad (1.26)$$

Основной запас АТ рассчитывается как:

$$OZAT = \Sigma_m + 750[\text{кг}], \quad (1.27)$$

где: Σ_m – сумма расходов АТ на всех участках.

Аэронавигационный запас определяется выражением:

$$AZH = 0,03 \cdot OZAT + PZAT. \quad (1.28)$$

РЗАТ определяется в соответствии с РЛЭ.

Если полученное значение АНЗ превышает принятое при расчете, то необходимо увеличить ОЗАТ из расчета 0,5% на каждую тонну добавленного АНЗ.

ПЗАТ в итоге определяется по формуле:

$$PZAT = OZAT + ANZ + 70 \cdot t_{pyl}[\text{кг}] + 350[\text{кг}]. \quad (1.29)$$

Допустимая коммерческая масса ВС определяется формулой:

$$m_{ДКН} = m_{noc} - AZH - m_{BC}. \quad (1.30)$$

Порядок расчетов по варианту 2. Особенности расчетов по второму варианту заключаются в следующем.

Определяется масса ВС в начале набора высоты:

$$m_{н.наб} = m_{взл} - 750[\text{кг}]. \quad (1.31)$$

где: 750 кг – расход АТ на взлет и разгон до скорости набора высоты.

Дальность $L_{наб}$, время $t_{наб}$ и расход АТ $m_{т.наб}$ определяются по таблицам и номограммам РЛЭ ВС и в значение дальности вносится поправка на ветер:

$$\Delta L_{наб} = \frac{1}{60} U t_{наб}. \quad (1.32)$$

Далее по сходной с вариантом 1 методике определяются дальность участков маршрутного полета и масса ВС применительно к каждому участку. Дальность участка маршрутного полета и время полета на этом участке рассчитываются с учетом направления и скорости ветра по формулам (1.12) и (1.13). Кроме этого, в расчетах определяются участки смены эшелонов и в значение дальности этих участков вносятся поправки на ветер, рассчитываемые по формуле (1.32). Выражения для дальности последнего участка маршрутного полета, участка снижения, массы ВС и расхода АТ аналогичны формулам методики варианта 1. В полученные значения дальности этих участков также вносятся поправки на ветер. ОЗАТ, АНЗ, ПЗАТ вычисляются в соответствии с (1.27) - (1.29), а РЗАТ определяется в соответствии с РЛЭ ВС. Допустимая коммерческая масса ВС определяется в соответствии с (1.30).

Рассмотренные методики определения ПЗАТ очевидно демонстрируют важность достоверной метеоинформации о состоянии атмосферы на маршруте полета, на аэродромах взлета и посадки, а также запасных аэродромах. Достоверность метеоинформации на маршруте полета ВС практически полностью определяется данными радиозондирования атмосферы, причем синоптик аэродромной метеослужбы, разрабатывающий метеопрогноз, может использовать как информацию об метеообстановке в виде прогностических карт, карт барической топографии и т.д., так и текущие данные радиозондирования от аэрологических станций, расположенных по маршруту полета ВС.

1.4. Роль данных радиозондирования в обеспечении достоверности метеоинформации

Выражения (1.4) и (1.5) устанавливают зависимость между вероятностью благополучного завершения полета $P_{БП}$, вероятностью прибытия без задержек рейса в аэропорт назначения $P_{РП}$ с одной стороны и достоверностью данных радиозондирования с другой стороны. Кроме этого, анализ методики FRAT показал очевидную зависимость между значением риска $R_{пол}$ и достоверностью метеопрогнозов и метеосводок о состоянии атмосферы на маршруте полета ВС, а также на аэродромах вылета и назначения. Проведем более детальный анализ влияния данных радиозондирования на достоверность метеопрогноза и формирование метеосводок о состоянии атмосферы на аэродромах и маршрутах полетов ВС.

Для разработки авиационных прогнозов погоды требуется достаточно обширный объем исходной информации. Кроме данных от аэродромных метеосистем метеоролог-синоптик использует в своей работе следующие исходные данные, поступающие по каналам системы передачи информации Росгидромета:

- карты абсолютной барической топографии АТ-850 для зоны влета и посадки ВС и АТ-200 для маршрутов полетов ВС;
- карты относительной барической топографии ОТ-500/1000;
- карты тропопаузы;
- карты максимального ветра;
- приземные синоптические и кольцевые карты погоды;
- прогностические карты уровней 400, 300, 200 гПа.

Метеоролог-синоптик может использовать данные метеорологических спутников и метеорологических радиолокаторов (МРЛ) сети Росгидромета, а также

«сырые» данные радиозондирования от СРЗ, находящихся вблизи аэродрома и по маршруту полета ВС. Перед началом разработки метеопрогнозов метеорологу-синоптик должен обработать весь имеющийся синоптический материал.

В Приложении Б на примере авиарейса Пулково (Санкт-Петербург)–Ларнака (Кипр), выполненного 15 марта 2018 г. представлены практические расчеты метеоролога аэродромной метеослужбы по метеообеспечению авиарейса с использованием текущих данных радиозондирования атмосферы. Приведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

1. На протяжении всего маршрута метеорологом должны учитываться данные пунктов радиозондирования атмосферы (аэрологические диаграммы), которые расположены на маршруте полета. Аэрологическая диаграмма дает наглядное представление о вертикальном распределении температуры, влажности и ветра. Текущие результаты радиозондирования могут быть использованы синоптиком, т.к. они передаются свободно в коде КН-04.

2. Важной частью расчетов являются:

- определение струйных течений и их прогноз, с использованием карт барической топографии уровней 400, 300 и 200 гПа и карт максимального ветра. Расчеты показали, что на протяжении трассы полета выявлено два струйных течения, причем планируемая траектория полета ВС с первой областью струйного течения (над Санкт-Петербургом и Таллином) не пересекается. Вторая область струйных течений обнаружена в районе пункта радиозондирования ИРАКЛИОН. Максимальная скорость ветра в струйном течении 148 км/ч (41 м/с), протяженность его – 6,5 км, ось на высоте 10282 гпм. ВС попадает в область струйного течения в четвертой четверти полета по маршруту и на этапе подхода к аэропорту назначения (попутный ветер);

- определение и прогноз атмосферной турбулентности, для которого используются данные радиозондирования атмосферы. Расчеты показали, что на всех этапах полета ВС отсутствуют условия возникновения опасной атмосферной турбулентности.

- определение и прогноз облачности, для которого используются данные радиозондирования атмосферы. Расчеты прогноза облачности аэропорта назначения проводились по данным пункта радиозондирования ИРАКЛИОН и показали (с учетом смещения воздушных масс) прогнозируемую трехбалльную облачность.

- прогноз опасных метеоявлений, для которого использовались данные радиозондирования атмосферы. Расчеты, проводимые методами Вайтинга и Фауста [21,23], показали вероятные грозы в районах Стамбула, Анкары, Измира, однако, трасса полета ВС указанные области не пересекает.

Очевидно, что метеопрогноз не может быть абсолютно точным. Существует некоторая ошибка в определении фактических метеоусловий.

Проведем анализ влияния ошибок метеопрогноза на расчетное значение ПЗАТ. В [43,149] показано, что дополнительные заправки топливом ΔC_U и ΔC_T , компенсирующие влияние ветра и температуры определяются выражениями:

$$\Delta C_U = k \frac{U_{\mathcal{E}} C_{ПЗАТ}^{MCA}}{V + U_{\mathcal{E}}}, \quad (1.33)$$

$$\Delta C_T = q_c t_{пол} \left(\sqrt{\frac{T_{\phi}}{T_{MCA}}} - 1 \right), \quad (1.34)$$

где: $U_{\mathcal{E}}$ - значение эквивалентного ветра на маршруте полета ВС, определяется выражением:

$$U_{\mathcal{E}} = U \cos \varepsilon - \frac{U^2}{2V} \sin^2 \varepsilon, \quad (1.35)$$

где: $\varepsilon = \delta_n - \beta$ - угол ветра, $\delta_n = \delta_m \pm 180^\circ$ - навигационное направление ветра, β - путевой угол, δ_m - метеорологическое направление ветра; $t_{пол}$ - время полета

ВС; $C_{ПЗАТ}^{MCA}$ – ПЗАТ, определенный по значениям СА; k - табулированный коэффициент, приведенный, например, в [149]; T_{MCA} – значение температуры воздуха на эшелоне полета ВС по СА; T_{ϕ} – фактическое значение температуры воздуха на эшелоне полета ВС; q_u – часовой расход топлива.

Представим ΔC_U и ΔC_T в виде:

$$\Delta C_U = \Delta C_U^u + \delta C_U, \quad \Delta C_T = \Delta C_T^u + \delta C_T, \quad (1.36)$$

где ΔC_U^u , ΔC_T^u – истинное значение дополнительной заправки топливом; δC_U , δC_T – ошибки вычисления значений дополнительной заправки топливом, определяемые ошибками метеопрогноза:

$$\delta C_U = \sum_{i=1}^n \varphi_i \delta_i, \quad \delta C_T = \sum_{j=1}^m \phi_j \delta_j, \quad (1.37)$$

где: δ_i , δ_j – ошибки измерения параметров, входящих в (1.33), (1.34); φ_i , ϕ_j – коэффициенты, определяемые формулами:

$$\varphi_i = \frac{\partial \Delta C_U(\delta_1, \dots, \delta_n)}{\partial \delta_i}, \quad \phi_j = \frac{\partial \Delta C_T(\delta_1, \dots, \delta_m)}{\partial \delta_j}, \quad (1.38)$$

n , m – число параметров, входящих в (1.32), (1.34), соответственно.

Учитывая (1.38) δC_U , δC_T имеют вид:

$$\delta C_U = \varphi_U \delta_U + \varphi_{\varepsilon} \delta_{\varepsilon}, \quad \delta C_T = \varphi_T \delta_T, \quad (1.39)$$

где:

$$\varphi_U = -kC_{ПЗАТ}^{MCA} V \frac{\cos \varepsilon - \frac{U}{V} \sin^2 \varepsilon}{\left(V + U \cos \varepsilon - \frac{U^2}{2V} \sin^2 \varepsilon \right)^2}$$

$$\varphi_\varepsilon = -kC_{ПЗАТ}^{MCA} V \frac{U \sin \varepsilon + \cos \varepsilon - 2 \frac{U^2}{V} \sin 2\varepsilon}{\left(V + U \cos \varepsilon - \frac{U^2}{2V} \sin^2 \varepsilon \right)^2}$$

$$\varphi_T = \frac{q_4 t_{пол}}{2T_{MCA}} \sqrt{\frac{T_\phi}{T_{MCA}}}$$

Оставшиеся параметры: $C_{ПЗАТ}^{MCA}$, V , q_4 , T_{MCA} , $t_{пол}$ в выражениях (1.33) и (1.34) являются либо величинами постоянными, либо их ошибками в расчётах можно пренебречь, т.к. они не зависят, или практически не зависят, от данных метеопрогноза. Ошибки $\delta_U = U - U'$, $\delta_\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon'$, $\delta_T = T_\phi - T'_\phi$ можно считать взаимно некоррелированными с нулевыми математическими ожиданиями.

На рис. 1.14 – рис. 1.16 представлены зависимости δC_U , δC_T от ошибок метеопрогноза на маршруте полета ВС. Представленные зависимости получены для примера, иллюстрируемого в Приложении Б. В таблице 1.2 приведены этапы и характеристики полета самолета А-319 рейса Пулково-Ларнака. Заданный эшелон FL335 (10200 м, 256 гПа).

Таблица 1.2 - Этапы и характеристики полета самолета А-319 рейса Пулково-Ларнака

Этап полета	Вертикальная скорость, м/с	Приборная скорость, км/ч	Время полета, с	Расстояние по траектории, км	Угол тангажа, град	Расстояние по горизонтали, км
Набор до 1500 м	12	305	125	10,59	8,14	10,48
Набор до 4550 м	11	535	277	41,17	4,25	41,06

Этап полета	Вертикальная скорость, м/с	Приборная скорость, км/ч	Время пролета, с	Расстояние по траектории, км	Угол тангажа, град	Расстояние по горизонтали, км
Набор до 7300 м	7	535	393	58,4	2,7	58,34
Набор до 10200	5	820	580	132,11	1,26	132,08
Крейсерский режим	0	830	15171	3497,8	0	3497,8
Снижение до 7300 м	5	820	580	132,11	1,26	132,8
Снижение до 3050 м	17,5	535	243	36,11	6,76	35,86
Снижение до 0 м	7,5	425	407	48,05	3,64	47,95

Для дальнейших расчетов выбран этап маршрутного полета, как самый продолжительный из этапов полета А-319 рейса Пулково-Ларнака. Протяженность маршрутного полета 3497,8 км, скорость полета на маршруте 830 км/ч, полет выполняется на эшелоне FL335 (10200 м). Часовой расход топлива самолета А-319 составляет 2600 кг/ч.

Прогноз метеопараметров атмосферы на эшелоне полета ВС показал, что ветер на эшелоне западный, т.е. по отношению к ВС ветер боковой. Скорость ветра составляет:

- для первой половины маршрута полета ВС 72 км/ч;
- для второй половины маршрута полета ВС 137 км/ч.

Температура воздуха на эшелоне полета по прогнозу составляет -53°C для первой половины маршрута и -64°C для второй половине маршрута. По прогнозу аномалий температуры на эшелоне полета не ожидается.

Интервал ошибок прогнозирования параметров ветра выбирался в соответствии с ФАП-60. Представленные на рис. 1.14-1.16 зависимости позволяют сделать следующие выводы.

1. Ошибка прогноза параметров ветра оказывает существенное влияние на расчет ПЗАТ, в частности, на дополнительную заправку, компенсирующую влияние ветра на маршруте полета. В пределах допустимой по ФАП-60 точности прогноза:

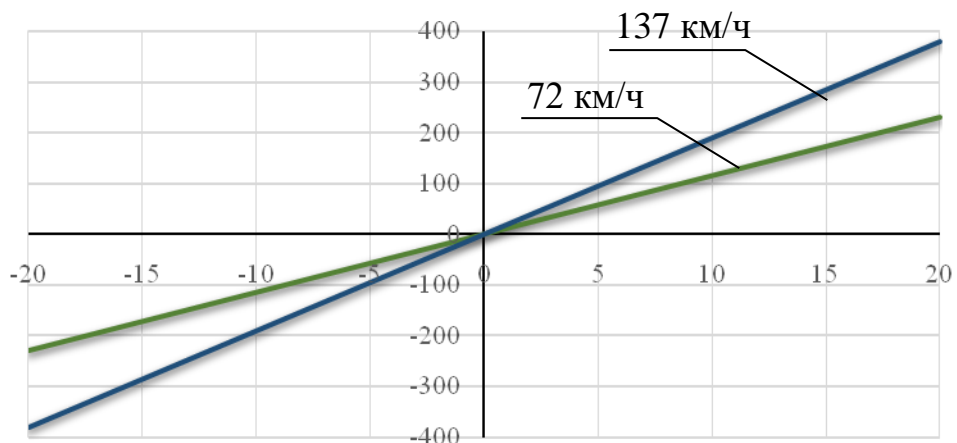


Рисунок 1.14 – График зависимости δC_U от ошибки прогноза скорости ветра на маршруте

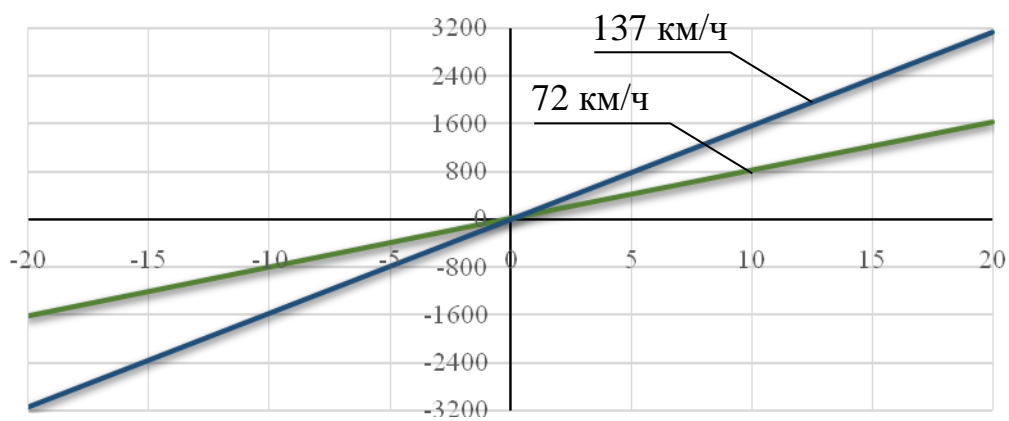


Рисунок 1.15 – График зависимости δC_ϵ от ошибки прогноза направления ветра на маршруте

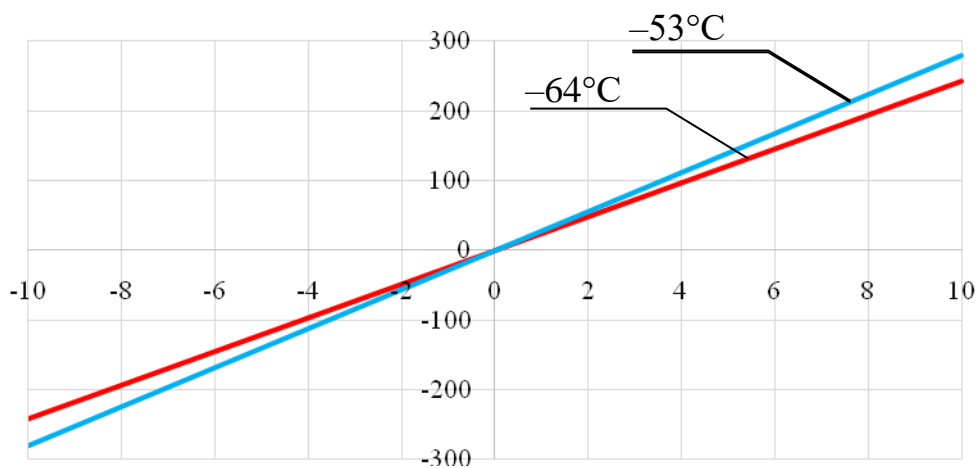


Рисунок 1.16 – График зависимости δC_ϵ от ошибки прогноза температуры воздуха на маршруте

для скорости ветра

- значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно ± 230 кг (для скорости ветра 72 км/ч) и ± 380 кг (для скорости ветра 137 км/ч);

для направления ветра

- значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно ± 1600 кг (для скорости ветра 72 км/ч) и ± 3200 (для скорости ветра 137 км/ч).

2. Ошибка прогноза температуры на эшелоне полета ВС не оказывает существенного влияния на расчет дополнительной заправки топливом. В пределах допустимой по ФАП-60 точности прогноза температуры значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно $\pm(50-60)$ кг. Однако, следует отметить, что данные радиозондирования могут содержать ошибки в несколько градусов, а также грубые ошибки аэрологов при составлении аэрологических телеграмм. В ряде случаев эти ошибки могут составлять до десятка градусов. В этом случае ошибки в заправке топливом могут достигать уже значительных значений, примерно $\pm(200-300)$ кг. В совокупности с ошибками δC_U это может привести к серьезным последствиям для безопасности полетов.

3. Ошибки в расчете ПЗАТ могут иметь следующие последствия:

- увеличение дополнительного компенсационного количества топлива, которое приводит к снижению массы коммерческой нагрузки ВС;
- уменьшение дополнительного компенсационного количества топлива, которое может привести к необходимости аварийной посадки на запасной аэродром или любой другой аэродром. Это приводит к снижению уровня безопасности и регулярности полетов.

Проведенный анализ подтверждает актуальность научно-технической задачи повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы, предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

Одной из узловых причин достаточно низкой достоверности метеоинформации является отсутствие в настоящее время на сети радиозондирования Росгидромета комплексных технических систем, позволяющих

обеспечить достоверность данных о состоянии атмосферы в любых условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке. Повышение достоверности данных радиозондирования путем комплексирования существующих СРЗ РЛ и СРЗ СТ представляет собой цель диссертационного исследования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1:

В ходе исследований, проведенных в главе 1, были получены следующие основные результаты:

1. На основании статистических данных ФГУП «Авиаметтелеком Росгидромета» за 2001-2020 гг. проведен анализ безопасности и регулярности полетов ВС ГА с учетом текущей и прогностической метеоинформации.

2. Проанализированы методики расчета потребного запаса топлива с учетом реальных метеорологических условий на маршруте полета.

3. Показана роль данных радиозондирования атмосферы в системе метеорологического обеспечения полетов ВС ГА.

4. Обоснована необходимость комплексирования систем радиозондирования различных типов, принцип работы которых основан на различных способах сопровождения радиозондов в атмосфере.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы:**

1. Процент авиационных происшествий, связанных с недостоверными метеопрогнозами, по-прежнему остается на достаточно высоком уровне (до 9%). Недостоверные метеопрогнозы являются одной из основных причин задержек авиарейсов (до 10%). Причинами такой сложившейся в системе метеообеспечения полетов ситуации является не только недостаточный уровень оснащения аэродромов современными метеосистемами, но и проблемы с качеством данных радиозондирования, получаемых от аэрологической сети Росгидромета.

2. Этап подготовки воздушного судна к полету требует точной метеоинформации о состоянии атмосферы на всех этапах полета. От качества метеоинформации напрямую зависит правильность расчета потребного запаса авиационного топлива. Основу метеоинформации о состоянии атмосферы на этапе полета по маршруту составляет информация от систем радиозондирования атмосферы.

3. Современные системы радиозондирования атмосферы обладают максимальной всепогодностью и информативностью. Однако, эти системы не являются помехозащищенными и требуют учета условий эксплуатации, особенно в мобильном исполнении. Низкая помехозащищенность систем радиозондирования атмосферы снижает достоверность данных радиозондирования. Это касается, в первую очередь, данных радиозондирования в тропосфере и нижней стратосфере, т.е. именно на тех высотах, на которых осуществляется полеты воздушных судов гражданской авиации. В некоторых случаях качество данных радиозондирования может быть неприемлемо для авиационных потребителей для получения достоверных прогнозов о состоянии тропосферы и нижней стратосферы.

4. Современные СРЗ РЛ и СРЗ СТ обладают рядом существенных недостатков, принципиально не устранимых в рамках каждой из систем.

Коренным образом улучшить качество функционирования систем радиозондирования различных типов можно выполнив их комплексирование на базе современных теорий комплексирования информации.

ГЛАВА 2. ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Понятие технического облика СРЗ КТ включает в себя:

- определение назначения системы и решаемых ею задач;
- определение принципов построения системы;
- разработку структуры, формирование режимов работы, а также уровней обработки информации;
- формирование требований к системе.

В начале дадим краткую характеристику существующих СРЗ РЛ и СРЗ СТ.

2.1. Краткая характеристика радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы

Современные СРЗ являются телеметрическими системами, в которых датчики непосредственно контактируют со свободной атмосферой, а измеряемые метеовеличины определяются, в основном, косвенным методом. Радиозонд (РЗ) в этом случае выполняет роль выносного преобразователя измеряемых метеовеличин в телеметрические сигналы, обеспечивая их передачу по радиоканалу (РК) на базовую станцию сопровождения (БСС).

БСС практически любой СРЗ состоит из двух основных подсистем:

- подсистемы измерения пространственных координат РЗ (ПИПКРЗ);
- подсистемы телеметрических измерений и передачи аэрологической информации (ПТИПАИ).

Системы радиозондирования, как правило, имеют общий радиоканал для ПИПКРЗ и ПТИПАИ и работают на частотах 403 МГц и 1680 МГц.

На территории РФ функционируют около 120 аэрологических станций (АЭ), 2 российских АЭ размещены в Антарктиде и 1 АЭ в Арктике. На рис.2.1а и рис. 2.1б приведены мировая и отечественная сеть станций радиозондирования атмосферы, соответственно.

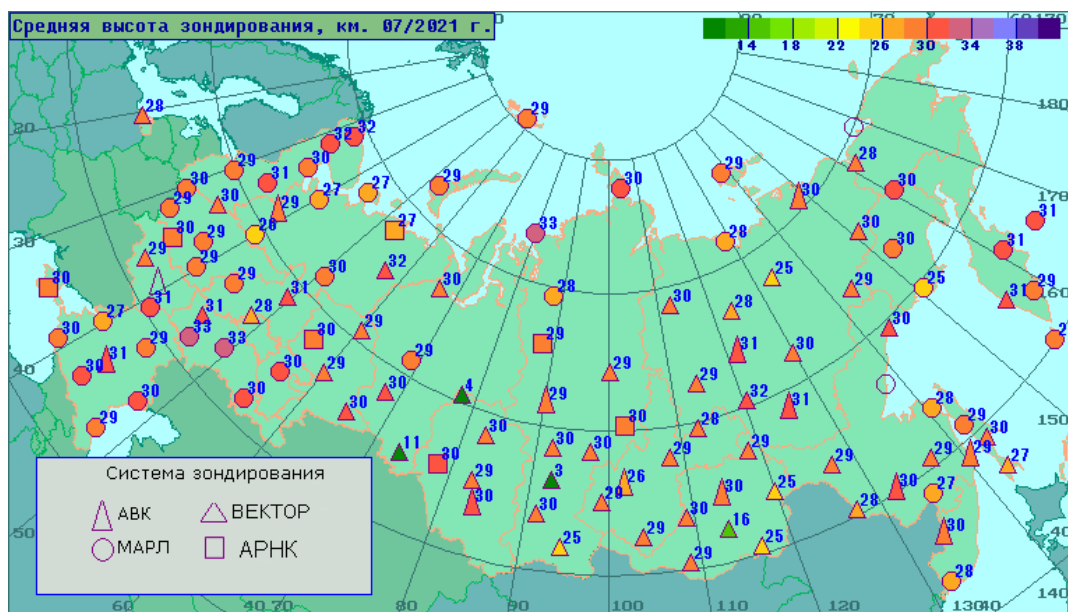


Рисунок 2.1а – Аэрологическая сеть Росгидромета

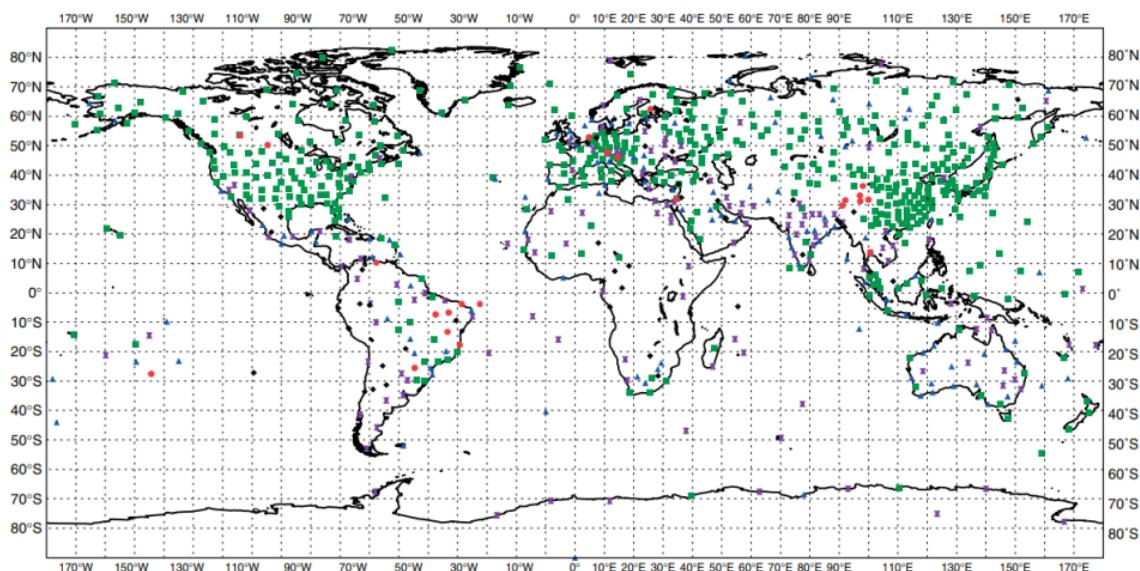


Рисунок 2.1б – Мировая аэрологическая сеть

Аэрологическая сеть Росгидромета оснащена СРЗ РЛ, а именно аэрологическими радиолокационными системами (АРЛС) МАРЛ-А(Т), ВЕКТОР-М, РАМ-2. Кроме этого, на аэрологической сети достаточное количество АЭ используют морально устаревшие АРЛС АВК-1М, некоторые из них сохраняются в качестве резервных систем. Характеристики СРЗ РЛ приведены в Приложении В.

Особый интерес для рассмотрения представляют погрешности определения координат радиозонда в СРЗ РЛ, анализ которых представлен в Приложении В.

Наиболее характерными, причем не устранимыми в существующих СРЗ РЛ, являются следующие причины возникновения этой погрешности:

- снижение точности определения угловых координат (азимута и угла места) РЗ и срывы слежения на больших удалениях от БСС;
- срывы автосопровождения РЗ при переходе через зенит;
- скачкообразные изменения дальности и высоты подъема РЗ, которые вызваны переключением режимов сопровождения РЗ;
- сопровождение РЗ боковыми лепестками ДНА антенной системы АРЛС;
- влияние подстилающей поверхности на надежность сопровождения РЗ.

Влияние этих причин может сделать данные радиозондирования вообще бесполезными для разработки метеопрогнозов.

Альтернативой СРЗ РЛ в последние годы становятся СРЗ, основанные на спутниковых технологиях сопровождения РЗ (GPS и/или ГЛОНАСС), т.е. СРЗ спутникового типа (СТ). Разработки таких систем ведутся мировыми производителями технических систем радиозондирования AIR, VAISALA, GRAW, а также отечественными разработчиками (АО «Радий», ООО «Аэроприбор»). СРЗ СТ имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности и использованию на подвижных объектах. Характеристики СРЗ СТ приведены в Приложении В.

В процессе разработки и эксплуатации были опробованы различные варианты построения СРЗ СТ, отличающиеся способами обработки навигационных сигналов. Однако, практически все системы для определения пространственных координат и скорости полета РЗ используют приемник СРНС, установленный на РЗ. В настоящее

время разработаны СРНС-приемники, работающие по сигналам нескольких СРНС – GPS, ГЛОНАСС, Galileo и БЭЙДОУ [77,78]. Вариант построения СРЗ СТ, основанный на использовании СРНС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ может быть наиболее перспективным в ситуации санкционного давления на РФ. В [159] рассматривается возможность использования дифференциального режима при определении пространственных координат РЗ. Этот режим позволяет увеличить точность определения пространственных координат РЗ и основан на использовании как минимум двух СРНС-приемников, один из которых (ЛККС) имеет точную геодезическую привязку на местности. Разности измеренных и рассчитанных в ЛККС значений псевдодальностей и псевдоскоростей используются в качестве корректирующих поправок к измерениям СРНС-приемника РЗ.

Отечественные разработки СРЗ СТ начаты сравнительно недавно, однако, уже около 40 АЭ оснащены СРЗ СТ. В настоящее время существуют две отечественные разработки спутниковой СРЗ - система ПОЛЮС и система ПОЛЕТ.

Система ПОЛЮС выполняется в стационарном или мобильном варианте (см. рис.2.2), а также входит в состав мобильной аэрологической системы МАС, которая эксплуатируется на космодромах «Байконур» и «Восточный». Существует 18 образцов этой системы, которые эксплуатируются на АЭ сети Росгидромета.

Система ПОЛЕТ в целом аналогична системе ПОЛЮС, но более компактна. На рис. 2.3 представлен комплект системы ПОЛЕТ и рабочее место аэролога. На сети Росгидромета эксплуатируется 21 такая система.

Особенностью систем ПОЛЮС и ПОЛЕТ является то, что на борту РЗ (МРЗ-Н1Б, АК-02мН) размещен навигационный модуль ГЛОНАСС/GPS. Координаты РЗ и измеренные метеопараметры атмосферы передаются по радиоканалу на БСС в цифровом виде.

Вместе с тем, для СРЗ СТ характерны недостатки, связанные с [19,32,37,40,43]:

- ошибками распространения навигационного сигнала (ионосферная ошибка, тропосферная ошибка, ошибка, обусловленная многолучевостью);

- ошибками, обусловленными взаимным расположением навигационных космических аппаратов (НКА) и РЗ (геометрический фактор);



Рисунок 2.2 - Стационарный и мобильный вариант системы ПОЛЮС

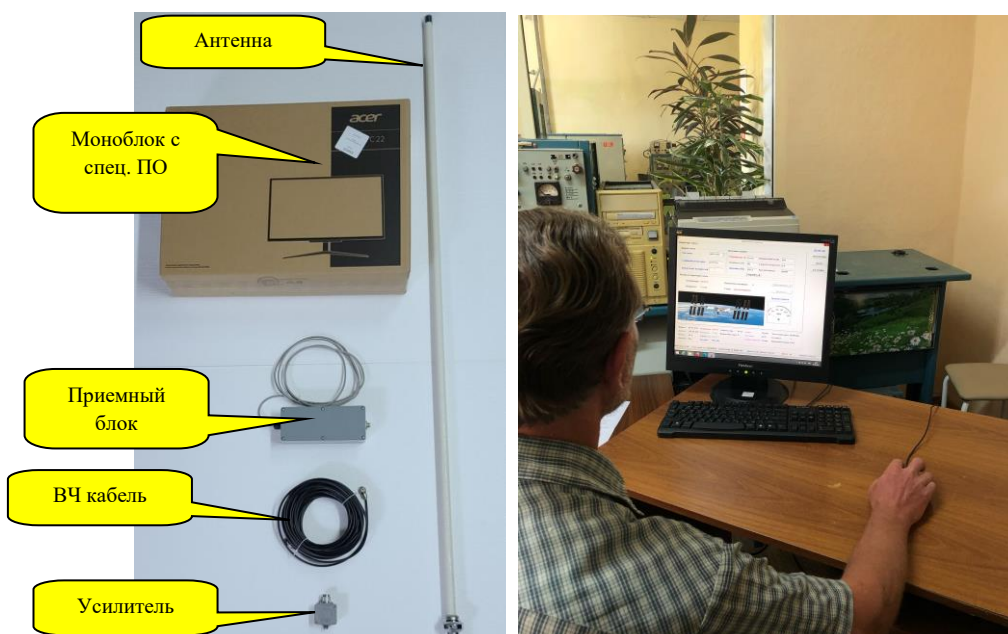


Рисунок 2.3 - Комплект системы ПОЛЕТ и рабочее место аэролога

- ошибками приемника навигационного модуля РЗ (шумы приемника, помехи, пропадание сигналов СНС, нарушение целостности системы, ситуации, связанные с нештатным функционированием НКА);

- неустойчивой работой в высоких широтах.

Высокая частота сбоев и потерь данных радиозондирования в СРЗ СТ заставила искать способы устранения этого недостатка. Американская компания International Met System разработала комбинированную СРЗ, которая работает в режимах GPS/RDF, а в качестве резервных имеет либо режим RDF, либо режим

GPS. Комбинированная СРЗ получила название Telemetry Receiving System (TRS). По утверждению разработчика и эксплуатирующих организаций было снижено число пробелов в данных радиозондирования, которые обусловлены отказами и сбоями GPS-приемника за счет резервного канала RDF.

Преимущества системы TLS:

- получение резервных данных о направлении и скорости ветра от радиолокационного канала (RDF);
- сигнализация потери данных от GPS канала в реальном времени;
- возможность применения как комплексных РЗ (GPS/RDF), так и РЗ радиолокационного (RDF) и спутникового (GPS) типа.

Вариант комбинированной СРЗ был рассмотрен в [78]. Особенностью этого решения является то, что комбинированная СРЗ работает в двух режимах: штатном и спутниковом. В штатном режиме АРЛС работает с радиолокационным РЗ типа МРЗ-3. Сопровождение РЗ осуществляется по угловым координатам и дальности традиционным радиолокационным способом. В спутниковом режиме АРЛС работает в пассивном режиме с навигационным РЗ типа МРЗ-Н1, обеспечивая прием сигналов телеметрии от РЗ.

Очевидным недостатком рассмотренных комбинированных СРЗ является то, что они лишь конструктивно объединяют СРЗ РЛ и СРЗ СТ в единую систему, не затрагивая алгоритмы обработки данных радиозондирования. Нельзя считать достоинством применение в системе нескольких типов РЗ. К тому же, простое комбинирование СРЗ РЛ и СРЗ СТ не позволяет существенно повысить достоверность данных радиозондирования, а именно:

- повысить помехоустойчивость комбинированной СРЗ;
- получить требуемую точность определения координат РЗ;
- обеспечить надежную передачу информации с борта РЗ на БСС.

Еще одним существенным недостатком предложенных вариантов построения СРЗ является принципиальная невозможность использования современных алгоритмов помехоустойчивой обработки информации без увеличения стоимости СРНС-модуля и РЗ в целом.

Качественно новый подход к построению СРЗ, позволяющий существенным образом повысить достоверность данных радиозондирования атмосферы, заключается в комплексировании СРЗ РЛ и СРЗ СТ, причем это комплексирование должно проводиться на уровне обработки сигналов каждой из систем.

2.2. Структура системы комплексной обработки данных радиозондирования атмосферы. Уровни и режимы обработки данных радиозондирования

Назначение СРЗ комплексного типа (КТ), аналогично назначению уже эксплуатируемых СРЗ. Она предназначена для проведения аэрологических наблюдений методом комплексного высотного зондирования атмосферы до высот 30-40 км. [43,119,133,136].

Задачи, решаемые СРЗ КТ также в целом аналогичны задачам существующих СРЗ и включают:

- приём и обработку информации от РЗ о температуре, влажности атмосферы и его координатах в режиме реального времени;
- расчет температуры, влажности, геопотенциальной высоты, скорости и направления ветра, координат радиозонда и полетного времени на уровнях стандартных изобарических поверхностей;
- формирование, архивацию, выдачу на экран результатов радиозондирования в соответствии с требованиями ВМО.

Основными принципами построения СРЗ КТ являются: комплексность и модульность системы.

Принцип комплексности заключается в совместной обработке данных радиозондирования от СРЗ РЛ и СРЗ СТ и имеет теоретическую базу, основанную на марковской теории оценивания случайных процессов (МТОСП). Достоинства

МТОСП подробно изложены в [169,171]. Методы МТОСП при разработке алгоритмов комплексной обработки информации (АКОИ) во многом обусловлены тем, что марковские методы позволяют реализовать оптимальное комплексирование измерителей на уровне первичной обработке информации (обработка радиосигналов), что в итоге обеспечивает высокую помехоустойчивость систем, их точность и надежность.

С технической точки зрения принцип комплексности должен обеспечивать высокую точность, помехоустойчивость и надежность передачи информации от РЗ на комплексную базовую станцию слежения (КБСС). Практическая реализация СРЗ КТ связана с установкой на РЗ ретранслятора радиосигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, в целях их последующей обработки в вычислителе КБСС. Таким образом, установка на борт РЗ ретранслятора радиосигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS позволит проводить решение навигационной задачи, т.е. задачи определения координат РЗ, в вычислителе КБСС. Указанный подход иллюстрируется на рис. 2.4.

На рис. 2.5 представлена структурная схема СРЗ КТ. В состав СРЗ КТ входит комплексная базовая станция слежения (КБСС) и РЗ.

В состав КБСС входят:

- ВЧ-тракты радиоканалов РК1 (403 МГц) и РК2 (1680 МГц);
- модули выделения сигналов телеметрии МВТИ РК1 и МВТИ РК2;
- модуль первичной комплексной обработки информации о пространственных координат РЗ (МПКОИ ПК), обеспечивающий решения задачи помехоустойчивого определения пространственных координат РЗ;
- блок формирования метеоинформации (БФМИ), обеспечивающий решение задачи определения параметров ветра и формирование выходной метеоинформации (аэрологической телеграммы).

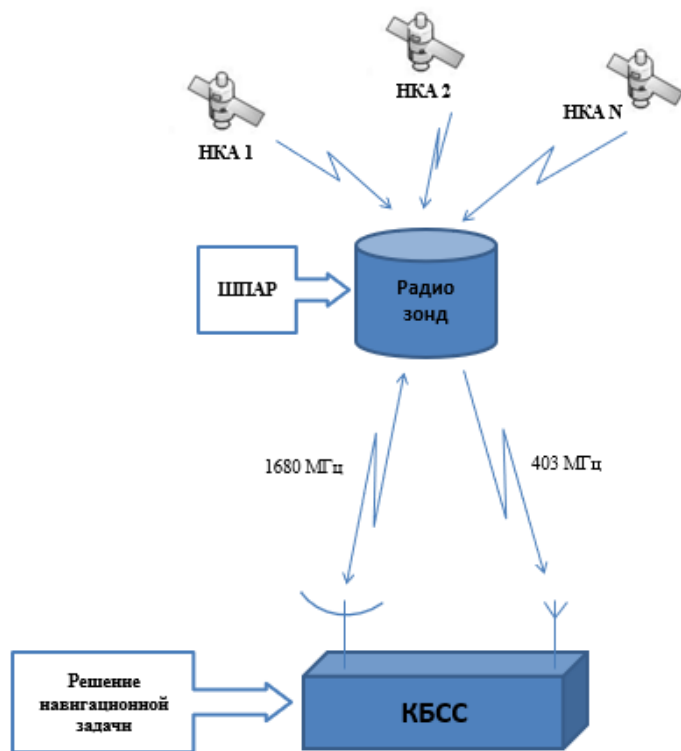


Рисунок 2.4 - Принцип работы СРЗ КТ

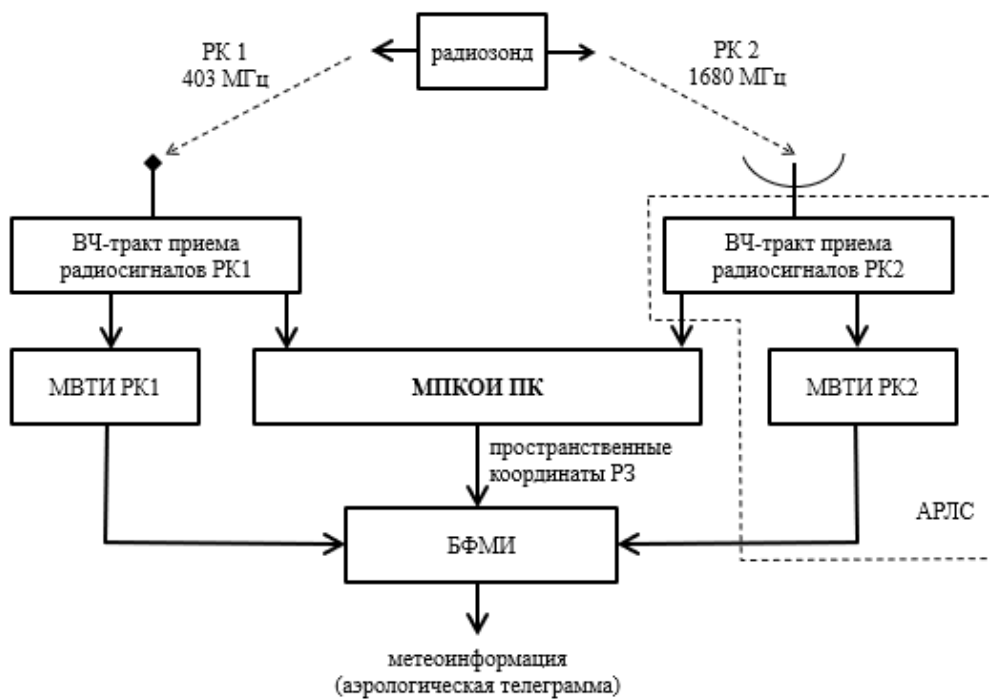


Рисунок 2.5 – Структурная схема СРЗ КТ

Особенностью схемы (рис.2.5) является то, что:

- канал РК1 обеспечивает передачу ретранслированных сигналов СРНС от РЗ. В КБСС осуществляется первичная обработка ретранслируемых сигналов СРНС и выдача их в МПКОИ ПК. Кроме этого, в МВТИ1 производится выделение информации о температуре и относительной влажности воздуха и выдача ее в БФМИ;

- канал РК2 обеспечивает передачу на РЗ запросных сигналов от АРЛС и ответных сигналов РЗ. КБСС производит первичную обработку ответных сигналов РЗ и выдачу их в МПКОИ ПК. МВТИ2 осуществляет выделение информации о температуре и относительной влажности из ответного сигнала РЗ и выдачу ее в БФМИ.

Каналы РК1 и РК2 являются независимыми и разнесенными по частоте примерно на 1270 МГц, что обеспечивает их электромагнитную совместимость.

Объединение СРЗ РЛ и СРЗ СТ в единую СРЗ КТ, по сути, осуществляется в МПКОИ ПК и БФМИ. Задачей МПКОИ ПК является первичная комплексная обработка радиосигналов по каналам РК1 и РК2 в целях определения координат РЗ. В БФМИ по данным о пространственных координат РЗ вычисляются направление и скорость ветра, происходит объединение полученных данных с измерениями температуры и влажности от МВТИ и формирование выходной аэрологической телеграммы.

Сложность и многообразие взаимосвязей между элементами СРЗ КТ, во многом определяют архитектуру КБСС. Уровни обработки информации в КБСС должны учитывать это и быть разделены на первичный, вторичный и третичный уровни. Уровни обработки информации представлена на рис. 2.6.

Первичный уровень обработки, реализуется в РЗ. Основными функциями этого уровня является формирование ответных радиосигналов по запросам АРЛС и ретранслированных радиосигналов СРНС и измерение температуры и влажности.

Основными функциями вторичного уровня обработки информации являются:

- первичная комплексная обработка радиосигналов СРНС и АРЛС с целью определения пространственных координат РЗ;

- выделение данных измерений температуры и влажности, передаваемых по РК1 и РК2.

Функциями третичного уровня обработки информации являются:

- вычисление параметров ветра;

- формирование выходной аэрологической телеграммы;
- индикация и архивирование данных зондирования.

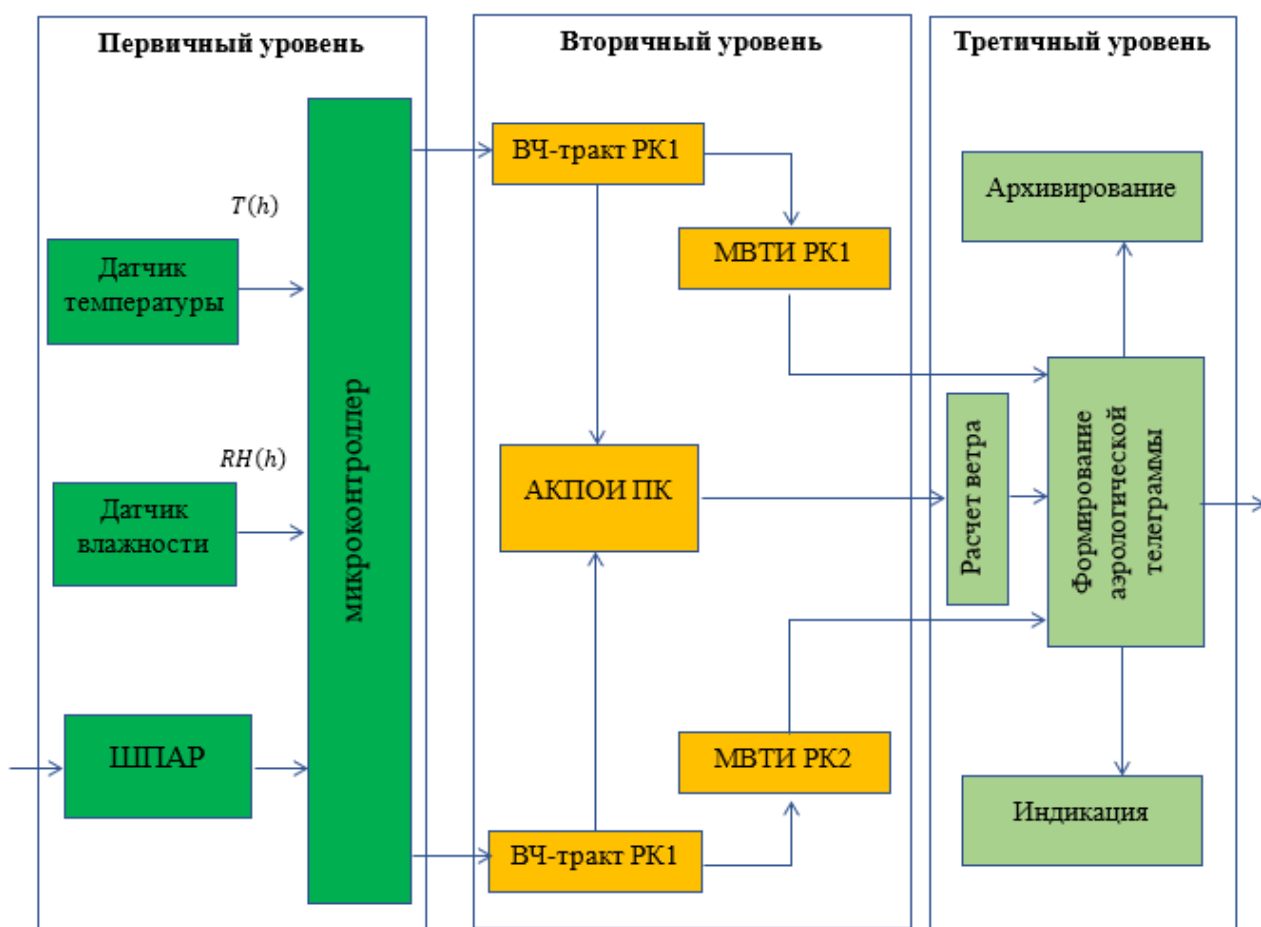


Рисунок 2.6 - Уровни обработки информации в КСПЗ

Основным режимом работы СПЗ КТ является режим комплексной обработки данных радиозондирования. В этом режиме по каналу РК1 передаются ретранслированные радиосигналы СРНС, их первичная комплексная обработка с радиосигналами канала РК2 в алгоритме первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах РЗ (АКПОИ ПК) и выделение информации о температуре и относительной влажности воздуха. В БФМИ проводится расчет параметров ветра и формирование аэрологической телеграммы.

При возникновении отказов или сильных помеховых воздействиях на СПЗ КТ КБСС должна обеспечивать переход на резервные режимы работы, а именно:

- режим работы по информации от РК1;

- режим работы по информации от РК2.

Режим работы по информации от РК1 обеспечивает аэрологические измерения и сопровождение РЗ по ретранслированным сигналам СРНС.

Режим работы по информации от РК2 РК1 обеспечивает аэрологические измерения и сопровождение РЗ по сигналам АРЛС.

2.3. Требования к комплексной системе радиозондирования атмосферы

Сформулируем основные требования к СРЗ КТ.

СРЗ КТ должна обеспечивать формирование достоверной аэрологической информации (данные о профиле температуры и влажности воздуха, профили скорости и направления ветра) от поверхности Земли до предельных высот подъема РЗ - 30-40 км, в соответствии с [119,136]. В СРЗ должно быть предусмотрено:

- формирование сообщений в виде аэрологических телеграмм по установленным аэрологическим кодам в телеграммах формата КН-04 (FM 35-IX Ext. TEMP или FM 38-IX Ext. TEMP MOBIL), СЛОЙ, ШТОРМ, ПРИЗЕМНЫЙ СЛОЙ, BUFR BUFR, таблиц ТАЭ-3, ТАЭ-16 с промежуточной выдачей этой информации по достижению радиозондом уровня 100 гПа;

- сохранение данных о координатах радиозонда и параметрах первичной телеметрической и обработанной информации, привязанных к полетному времени, в течение не менее 365 суток, в файлах на жестком диске компьютера;

- ввод, хранение, архивация первичной предполетной проверки и другой служебной информации и получение ее по запросу оператора-аэролога.

В состав СРЗ КТ должны входить:

1) РЗ с ретранслятором сигналов СРНС (штатные РЗ системы);

2) КБСС в составе:

- ВЧ-тракты приема радиосигналов по каналам РК1 и РК2;
- модули выделения телеметрической информации каналов РК1 и РК2;
- антенные системы;
- МПКОИ ПК и БФМИ.

Кроме этого, должна быть предусмотрена возможность работы СРЗ КТ с РЗ существующих СРЗ СТ (МРЗ-Н1, АК-02МН) и СРЗ РЛ (МРЗ-3, АК-02 и др.).

Штатные РЗ должны обеспечивать измерение параметров атмосферы в диапазонах: температура воздуха - $-90 - +50^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха - 0-100%; атмосферное давление - 1100-2 гПа.

Технические требования к штатным РЗ СРЗ КТ приведены в таб.2.1.

Время подготовки штатного РЗ к выпуску должно составлять не более 15 минут.

Условия эксплуатации КБСС должны удовлетворять следующим требованиям:

- температура окружающей среды для аппаратуры КБСС от 0 до плюс 50°C ;
- температура окружающей среды для антенной системы от минус 50 до плюс 50°C ; атмосферное давление от 850 до 1080 гПа;
- относительная влажность не более 90 % при 40°C для аппаратуры КБСС;
- относительная влажность не более 98 % при температуре 25°C для антенной системы.

Программное обеспечение (ПО) СРЗ КТ должно обеспечивать получение информации от РЗ о температуре, влажности и координатах РЗ, проводить её начальную обработку и проверку на допустимость полученных результатов измерений. На основании полученных в результате обработки данных ПО должно обеспечивать формирование архивов.

Кроме этого, ПО СРЗ КТ должно обеспечивать:

- проверку радиозонда перед выпуском на правильность измерения температуры и влажности и контроль допустимых погрешностей;
- автоматическое определение момента начала зондирования;
- автоматическое определение момента завершения зондирования;
- определение длительности зондирования;

- определение в режиме реального времени вертикального распределения метеопараметров по высоте с периодом 2 с, автоматический выбор из этих уровней с возможностью коррекции оператором особых точек по температуре, влажности и ветру, уровней тропопаузы и максимального ветра (с расчетом сдвига ветра).

Таблица 2.1 – Технические требования к штатным РЗ СРЗ КТ

Метеопараметр	Диапазон измерения
Требования к каналу передачи метеоинформации	
Скорость передачи данных, бод	не менее 1200
Период обновления информационного пакета, с	не более 2
Датчик температуры	
Предел допускаемой абсолютной погрешности, °С	не более 0,1
Датчик влажности	
Предел допускаемой абсолютной погрешности по каналу относительной влажности (при температуре выше - 40 °С), %:	не более 5 (для диапазона относительной влажности 10-90%) не более 8 (для диапазона относительной влажности 0-10 % и 90-100%)
Массо-габаритные характеристики	
Габаритные размеры радиозонда, подготовленного к полету, без учета передающей антенны Д×Ш×В, мм:	не более 310×180×330
Полетная масса радиозонда, кг	не более 0,2
Продолжительность непрерывной работы радиозонда с момента подключения к нему батареи	не менее 2 ч.

ПО СРЗ КТ должно иметь защиту от несанкционированного доступа и от ошибочных действий оператора-аэролога.

Основными требованиями к размещению СРЗ КТ:

- площадка для установки оборудования и антенных систем СРЗ КТ должна быть размером не менее 200 м x 200 м;

- место расположения антенных систем должно исключать возможность взаимных радиопомех с радиолиниями и другими радиотехническими системами;
- на расстоянии менее 500 метров от антенных систем не должно быть источников промышленных помех (мощных силовых установок, высоковольтных линий электропередачи и проч.);
- расстояние от СРЗ КТ до места выпуска РЗ не менее 100 м;
- высота установки антенной системы СРЗ КТ не менее 2,5 м от поверхности земли.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В ходе исследований, проведенных в главе 2, были получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы системы радиозондирования радиолокационного и спутникового типа, вскрыты их основные недостатки и достоинства.
2. Разработана структура системы комплексной обработки данных радиозондирования атмосферы.
3. Определены уровни обработки информации в системе комплексной обработки данных радиозондирования атмосферы и режимы обработки данных радиозондирования.
4. Сформулированы требования к комплексной системе радиозондирования атмосферы.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы:**

1. Характерными, причем не устранимыми в существующих СРЗ РЛ, являются следующие причины возникновения погрешностей определения координат РЗ:
 - снижение точности определения угловых координат (азимута и угла места) РЗ и срывы слежения на больших удалениях от БСС;
 - срывы автосопровождения РЗ при переходе через зенит;

- скачкообразные изменения дальности и высоты подъема РЗ, которые вызваны переключением режимов сопровождения РЗ;

- сопровождение РЗ боковыми лепестками ДНА антенной системы АРЛС;

- влияние подстилающей поверхности на надежность сопровождения РЗ.

Характерными, причем также не устранимыми в существующих СРЗ СТ, являются следующие причины возникновения погрешностей определения координат РЗ:

- ошибки распространения сигнала (ионосферная ошибка, тропосферная ошибка, ошибка, обусловленная многолучевостью);

- ошибки, обусловленные взаимным расположением навигационных космических аппаратов (НКА) и РЗ (геометрический фактор);

- ошибки приемника навигационного модуля РЗ (шумы приемника, помехи, пропадание сигналов СРНС);

- ошибки обусловленные нарушением целостности системы, а также ситуации, связанные с нештатным функционированием НКА);

- неустойчивая работа СРНС в высоких широтах.

Влияние этих причин может сделать данные радиозондирования малополезными для разработки авиационных метеопрогнозов.

2. Качественно новый подход к построению СРЗ, позволяющий существенным образом повысить достоверность данных радиозондирования атмосферы, заключается в комплексировании СРЗ РЛ и СРЗ СТ, причем это комплексирование должно проводиться на уровне обработки радиосигналов каждой из систем.

Узловой является задача разработки алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах РЗ, т.к. от качества решения этой задачи зависит достоверность данных о скорости и направлении ветра на высотах зондирования и точность привязки измерений к конкретной точке в пространстве, а следовательно, и достоверность метеопрогнозов на маршруте и в районе полетов ВС.

Теоретической базой синтеза алгоритмов комплексной обработки информации является марковская теории оценивания случайных процессов. Методы марковской теории оценивания случайных процессов при разработке алгоритмов комплексной

обработки информации обладают определенными достоинствами, которые связаны с тем, что марковские методы позволяют реализовать оптимальное комплексирование измерителей на уровне первичной обработке информации (обработка радиосигналов), что обеспечивает высокую помехоустойчивость комплексных систем, их точность и надежность.

3. Особенностью разработанной структура комплексной системы радиозондирования атмосферы являются комплексная базовая станция слежения за РЗ, в состав которой входят: ВЧ-тракты радиоканалов РК1 (403 МГц) и РК2 (1680 МГц); модули выделения сигналов телеметрии МВТИ РК1 и МВТИ РК2; модуль первичной комплексной обработки информации о пространственных координат РЗ (МПКОИ ПК), обеспечивающий решения задачи помехоустойчивого определения пространственных координат РЗ; блок формирования метеоинформации (БФМИ), обеспечивающий решение задачи определения параметров ветра и формирование выходной метеоинформации (аэрологической телеграммы). Каналы РК1 и РК2 являются независимыми и разнесенными по частоте примерно на 1270 МГц, что обеспечивает их электромагнитную совместимость.

Объединение систем радиозондирования радиолокационного и спутникового типа в единую комплексную систему радиозондирования, по сути, осуществляется в МПКОИ ПК и БФМИ.

4. В комплексной систем радиозондирования предусмотрены три уровня обработки информации: первичный, вторичный и третичный уровни.

Основными функциями первичного уровня являются формирование ответных радиосигналов по запросам АРЛС и ретранслированных радиосигналов СРНС и измерение температуры и влажности.

Основными функциями вторичного уровня обработки информации является первичная комплексная обработка радиосигналов СРНС и АРЛС с целью определения пространственных координат РЗ; выделение данных измерений температуры и влажности, передаваемых по РК1 и РК2.

Основными функциями третичного уровня обработки информации являются: вычисление параметров ветра; формирование выходной аэрологической

телеграммы; индикация и архивирование данных зондирования.

5. Основным режимом работы комплексной системы радиозондирования является режим комплексной обработки данных. В этом режиме осуществляется комплексная первичная обработка ретранслированных радиосигналов СРНС и радиосигналов АРЛС, а также выделение из сигналов информации о температуре и относительной влажности воздуха.

Предусмотрены резервные режимы работы: режим работы по информации только от СРНС (РК1); режим работы по информации от АРЛС (РК2).

6. Сформулированы основные требования к составу комплексной системы радиозондирования атмосферы, ее функциональным возможностям, условиям эксплуатации комплексной базовой станции слежения и диапазону измеряемых параметров атмосферы. Определены общие требования к программному обеспечению комплексной базовой станции слежения. Одним из необходимых требований к программному обеспечению является необходимость защиты от несанкционированного доступа и от ошибочных действий оператора-аэролога.

Сформулированы основные требования к размещению комплексной системы радиозондирования на местности.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Узловой задачей при разработке алгоритмического обеспечения СРЗ КТ является задача синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах РЗ. В соответствии с методикой синтеза алгоритмов первичной комплексной обработки информации на основе марковской теории оценивания случайных процессов, изложенной в [171], первым ее этапом является постановка задачи, включающая в себя:

- разработку математических моделей полезных радиосигналов и помех;
- разработку математических моделей информационных и сопутствующих процессов;
- выбор критерия оптимизации.

Последующие этапы методики связаны с синтезом алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда и оценкой характеристик его помехоустойчивости и точности.

3.1. Постановка задачи исследований синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

Как показано в [37,38] сигнал СРНС, излучаемый каждым навигационным космическим аппаратом (НКА), представляет собой шумоподобный сигнал (ШПС), содержащий дальномерный код, навигационное сообщение и служебную информацию.

Полезный сигнал СРНС на борту радиозонда применительно к одному НКА и использованию модуляции несущей частоты псевдослучайной последовательностью (ПСП) грубого кода для $t \in [t_k, t_{k+T}]$, $k = 0, 1, 2, \dots$ можно представить в виде [43]:

$$s(t, d_c, \varphi_c, \theta) = A_c(t) g\left(t - \frac{d_c(t)}{c}\right) \sin(\omega_c t + \theta\pi + \varphi_c(t)), \quad (3.1)$$

где: $A_c(t)$ и ω_c – амплитуда и частота полезного радиосигнала НКА; $d_c(t)$ – псевдодальность НКА-радиозонд; $\varphi_c(t)$ – случайный набег фазы сигнала; θ – дискретный параметр, принимающий значение 0 или 1 в зависимости от передаваемой НКА служебной информации в течение времени T ; $g(t)$ – ПСП дальномерного кода, определяемая выражением:

$$g(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L a_l \text{rect}(t - (n-1)T_n - (l-1)\tau_{\text{дк}}), \quad (3.2)$$

где: a_l – коэффициент, принимающий значения ± 1 , в зависимости от модулирующей ПСП; n – номер модулирующей ПСП; l – номер посылки модулирующей ПСП; $\tau_{\text{дк}}$ – длительность импульса модулирующей ПСП; $(n-1)T_n - (l-1)\tau_{\text{дк}}$ – момент излучения l -й посылки n -той ПСП дальномерного кода; L – длина ПСП дальномерного кода; $N = \frac{T}{T_n}$ – количество периодов ПСП дальномерного кода, излученных за время T .

Случайный набег фазы $\varphi_c(t)$ обусловлен следующими факторами:

- эффектом Доплера;
- нестабильностью частоты задающего генератора (ЗГ);
- условиями распространения радиоволн.

Ретранслятор радиозонда переизлучает принятый радиосигнал НКА на частоте $\omega_p = 403$ МГц. В [43,117] достаточно подробно рассмотрены типы ретрансляторов СРНС, проанализированы их возможности, определены их достоинства и недостатки. Будем полагать, что для ретрансляции сигналов СРНС на радиозонде установлен широкополосный аналоговый ретранслятор (ШПАР). Этот тип ретранслятора конструктивно прост и не требует больших финансовых вложений в производство. Полезный сигнал, принятый КБСС может быть представлен как:

$$s_p(t, d_\Sigma, \varphi_p, \theta) = A_p(t) g\left(t - \frac{d_\Sigma(t)}{c}\right) \sin(\omega_p t + \theta\pi + \varphi_p(t)), \quad (3.3)$$

где: $d_\Sigma(t)$ – псевдодальность НКА-радиозонд-БС; $\varphi_p(t)$ - случайный набег фазы, обусловленный теми же факторами, что и $\varphi_c(t)$; $A_p(t)$ – амплитуда ретранслируемого радиосигнала.

Информационным радионавигационным параметром (РНП), необходимым для определения пространственных координат радиозонда является псевдодальность $d_\Sigma(t)$ и доплеровское смещение частоты радиосигнала $\frac{\omega_p}{c} \frac{dd_\Sigma(t)}{dt}$.

Псевдодальность для одного НКА определяется как [43]:

$$d_\Sigma = d_{HKA-P3} + d_{P3-BC} + \delta d_u + \delta d_{mp} + \delta d_\vartheta + \delta d_{ув} + \delta d_\varphi + \delta d_p, \quad (2.4)$$

где: d_{HKA-P3} - расстояние от НКА до радиозонда в момент излучения и приема сигнала; d_{P3-BC} - расстояние от радиозонда до БС в момент излучения и приема сигнала; δd_u - прирост дальности за счет ионосферной задержки сигнала; δd_{mp} - прирост дальности за счет тропосферной задержки сигнала; δd_ϑ - прирост дальности за счет неточного прогноза эфемерид; δd_φ - случайные изменения псевдодальности,

вызванные, например, осцилляциями и уходом частоты задающего генератора ретранслятора радиозонда; $\delta d_{ув}$ - прирост дальности, вызванный сдвигом шкал времени на РЗ и НКА; δd_p - прирост дальности, обусловленный временем задержки сигнала в ретрансляторе.

Модель $\varphi_p(t)$, может быть описана системой дифференциальных уравнений [43]:

$$\frac{d\varphi_p(t)}{dt} = \Delta\omega_p(t) - \frac{\omega_p}{c} \frac{dd_\Sigma(t)}{dt} + \sqrt{\frac{N_\varphi}{2}} n_\varphi(t), \varphi_p(t_0) = \varphi_{p0}, \quad (3.5)$$

$$\frac{d\Delta\omega_p(t)}{dt} = -\gamma_\omega \Delta\omega_p(t) + \sqrt{2\gamma_\omega \sigma_\omega^2} n_\omega(t), \Delta\omega_p(t_0) = \Delta\omega_{p0}, \quad (3.6)$$

где: $\Delta\omega_p(t)$ – уход частоты за счет нестабильности задающего генератора ретранслятора радиозонда; $n_\varphi(t)$ и $n_\omega(t)$ – формирующие белые гауссовские шумы с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; γ_ω – коэффициент, характеризующий ширину спектра флуктуаций частоты задающего генератора ретранслятора радиозонда; σ_ω^2 – дисперсия флуктуаций частоты задающего генератора; N_φ – величина, характеризующая естественную нестабильность частоты ЗГ.

АРЛС представляет собой систему вторичной радиолокации. В течение 2,56 с. АРЛС излучает серию коротких запросных импульсов с периодом повторения $T_{зи}$. Радиозонд излучает ответные радиосигналы, математическая модель которых может быть записана в виде:

$$s_{pl}(t, \hat{d}_{pl}, \varphi_{pl}) = \sum_{i=1}^I A_{pl}(t) \exp \left(-\frac{\pi}{2\tau_u^2} \left(t - \theta_i - \frac{\hat{d}_{pl}}{2} \right)^2 \right) \times \cos \left(\omega_{pl} \left(t - \theta_i - \frac{\hat{d}_{pl}}{2} \right) + \varphi_{pl}(t) \right) \quad (3.7)$$

где: $A_{pl}(t)$ и $\varphi_{pl}(t)$ – амплитуда и фаза принимаемого сигнала от радиозонда; $\omega_{pl}=1680$ МГц – рабочая частота АРЛС; $\tau_u=1$ мкс – длительность импульса; $\theta_i = (i-1)T_{su}$ – момент излучения i -го импульса в серии.

Дальнейшее рассмотрение задачи синтеза будем проводить с учетом согласованности в КБСС шкал времени СРНС и АРЛС.

Информационным радиолокационным параметром является \hat{d}_{pl} , который определяется выражением:

$$\hat{d}_{pl} = 2d_{P3-BC} + \delta d_{P3}, \quad (3.8)$$

где: δd_{P3} – приращение дальности, обусловленное задержкой на формирование ответного сигнала радиозонда.

Модель $\varphi_{pl}(t)$ достаточно полно описывается уравнениями вида (3.5), (3.6) и применительно к (3.7) имеет вид:

$$\frac{d\varphi_{pl}(t)}{dt} = \Delta\omega_{pl}(t) - \frac{\omega_{pl}}{c} \frac{d\hat{d}_{pl}(t)}{dt} + \sqrt{\frac{N'_\varphi}{2}} n'_\varphi(t), \varphi_{pl}(t_0) = \varphi_{pl0}, \quad (3.9)$$

$$\frac{d\Delta\omega_{pl}(t)}{dt} = -\gamma'_\omega \Delta\omega_{pl}(t) + \sqrt{2\gamma'_\omega \sigma_\omega^2} n'_\omega(t), \Delta\omega_{pl}(t_0) = \Delta\omega_{pl0}, \quad (3.10)$$

где: $\Delta\omega_{pl}(t)$ – уход частоты за счет нестабильности задающего генератора передатчика радиозонда; $n'_\varphi(t)$ и $n'_\omega(t)$ – формирующие белые гауссовские шумы с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; γ'_ω – коэффициент, характеризующий ширину спектра флуктуаций частоты задающего генератора передатчика радиозонда; σ_ω^2 – дисперсия флуктуаций частоты задающего генератора; N'_φ – величина, характеризующая естественную нестабильность частоты ЗГ.

Таким образом, соотношения (3.1)-(3.10) позволяют достаточно полно описать полезные радиосигналы РК1 и РК2 на входе приемных устройств КБСС.

Точность измерения РНП в значительной степени зависит от помех. Наиболее вероятными для системы радиозондирования атмосферы являются широкополосные флуктуационные помехи, а также помехи, обусловленные собственными шумами приемных устройств БС, флуктуационным характером поглощения радиоволн в атмосфере, тепловым излучением Земли и т.п. В дальнейшем в работе рассматривается случай наличия только широкополосных помех естественного происхождения.

Широкополосные помехи могут быть описаны моделью белого гауссовского шума (БГШ) с известными статистическими характеристиками:

$$M\{n(t)\} = 0, \quad M\{n(t)n(t-\tau)\} = \frac{N_n}{2}\delta(\tau), \quad (3.11)$$

где: $N_n = kT_{III}$ – спектральная плотность шумов; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{Вт} \cdot \text{с}/\text{К}$ – постоянная Больцмана; T_{III} – эквивалентная шумовая температура внешних шумов приемных устройств КБСС; $\delta(\tau)$ – дельта функция Дирака.

Учитывая то, что для РК1 и РК2 широкополосные помехи имеют разные характеристики наблюдения на входе приемного устройства СРНС $\xi_p(t)$ и приемного устройства АРЛС $\xi_{pl}(t)$ КБСС, можно представить в виде:

$$\xi_p(t) = s_p(t, d_\Sigma, \varphi_p, \theta) + n_p(t), \quad (3.12)$$

$$\xi_{pl}(t) = s_{pl}(t, \hat{d}_{pl}, \varphi_{pl}) + n_{pl}(t), \quad (3.13)$$

где: $n_p(t)$ и $n_{pl}(t)$ – широкополосные помехи РК1 и РК2, соответственно.

Анализ математической модели полезного радиосигнала (3.1) показывает, что информационный РНП d_Σ является функцией геоцентрических координат радиозонда. Аналогичные рассуждения применительно к информационному РНП \hat{d}_{pl} в модели (3.7) позволяют сделать вывод, что этот параметр также можно представить как функцию от геоцентрических координат радиозонда. Очевидно, что оптимальные оценки пространственных координат радиозонда целесообразно формировать в этой системе координат, а не в какой-либо из систем координат, используемых только СРНС и АРЛС.

Группа компонент вектора состояния, описывающая динамику изменения пространственных координат радиозонда в турбулентной атмосфере, может быть представлена в виде [43]:

$$\dot{x}(t) = V_x(t), \dot{y}(t) = V_y(t), \dot{z}(t) = V_z(t), \quad (3.14)$$

$$x(t_0) = x_0, y(t_0) = y_0, z(t_0) = z_0,$$

$$\dot{V}_x(t) = a_x(t), \dot{V}_y(t) = a_y(t), \dot{V}_z(t) = a_z(t), \quad (3.15)$$

$$V_x(t_0) = V_{x0}, V_y(t_0) = V_{y0}, V_z(t_0) = V_{z0},$$

$$\dot{a}_x(t) = -(\rho_a + \rho_b)a_x(t) + \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{ax}^2}n_{ax}(t),,$$

$$\dot{a}_y(t) = -(\rho_a + \rho_b)a_y(t) + \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{ay}^2}n_{ay}(t), \quad (3.16)$$

$$\dot{a}_z(t) = -(\rho_a + \rho_b)a_z(t) + \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{az}^2}n_{az}(t),$$

$$a_x(t_0) = a_{x0}, a_y(t_0) = a_{y0}, a_z(t_0) = a_{z0}.$$

где: ρ_a - коэффициент, определяемый аэродинамическими характеристиками РЗ; ρ_b - параметр, характеризующий ширину спектра флуктуаций скорости ветра; $n_{ax}(t)$, $n_{ay}(t)$, $n_{az}(t)$ - формирующие белые гауссовские шумы с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; σ_{ax}^2 , σ_{ay}^2 , σ_{az}^2 - дисперсии флуктуаций ускорения, зависящие от характера движения радиозонда в атмосфере.

При таком варианте задания компонент вектора состояния, описывающих динамику движения радиозонда в атмосфере информационный РНП d_Σ и его производная описываются выражениями:

$$d_\Sigma = \sqrt{(x_{НКА} - x)^2 + (y_{НКА} - y)^2 + (z_{НКА} - z)^2} + \sqrt{(x_{BC} - x)^2 + (y_{BC} - y)^2 + (z_{BC} - z)^2} + \delta d, \quad (3.17)$$

$$\dot{d}_\Sigma = (K_x + \tilde{K}_x)V_x + (K_y + \tilde{K}_y)V_y + (K_z + \tilde{K}_z)V_z - (K_x W_x + K_y W_y + K_z W_z), \quad (3.18)$$

где: $x_{НКА}$, $y_{НКА}$, $z_{НКА}$ - координаты НКА в геоцентрической системе координат; x_{BC} , y_{BC} , z_{BC} - координаты БС в геоцентрической системе координат; W_x , W_y , W_z -

известные на основе обработки навигационных сообщений проекции земных скоростей НКА на оси ГСК; $K_x, K_y, K_z, \tilde{K}_x, \tilde{K}_y, \tilde{K}_z$ - направляющие косинусы:

$$K_x = \frac{x(t) - x_{НКА}(t)}{d_{НКА-РЗ}(t)}, K_y = \frac{y(t) - y_{НКА}(t)}{d_{НКА-РЗ}(t)}, K_z = \frac{z(t) - z_{НКА}(t)}{d_{НКА-РЗ}(t)}. \quad (3.19)$$

$$\tilde{K}_x = \frac{x(t) - x_{BC}(t)}{d_{РЗ-BC}(t)}, \tilde{K}_y = \frac{y(t) - y_{BC}(t)}{d_{РЗ-BC}(t)}, \tilde{K}_z = \frac{z(t) - z_{BC}(t)}{d_{РЗ-BC}(t)}. \quad (3.20)$$

Информационный РНП \hat{d}_{pl} и его производная описываются выражениями:

$$\hat{d}_{pl} = 2\sqrt{(x_{BC} - x)^2 + (y_{BC} - y)^2 + (z_{BC} - z)^2} + \delta d_{pз}, \quad (3.21)$$

$$\dot{\hat{d}}_{pl} = 2\tilde{K}_x V_x + 2\tilde{K}_y V_y + 2\tilde{K}_z V_z. \quad (3.22)$$

Радиозонд является низкодинамичным объектом, скорость его подъема не превышает 5-7 м/с, следовательно, значения (3.19), (3.20) на интервале времени $t \in [t_k, t_k + T]$ можно считать постоянными.

Учитывая математические модели (3.5)-(3.10) и уравнения динамики изменения пространственных координат радиозонда (3.14)-(3.16) вектор состояния, подлежащий оцениванию имеет вид:

$$\mathbf{X}^T = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, a_x, a_y, a_z, \varphi_p, \varphi_{pl}, \Delta\omega_p, \Delta\omega_{pl}, \delta d]. \quad (3.23)$$

Уравнение, описывающее динамику вектора состояния в векторно-матричной форме, имеет вид [37,38]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{C}\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}\mathbf{N}(t), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (3.24)$$

где: $\mathbf{N}(t) = [n_{ax}, n_{ay}, n_{az}, n_{\varphi}, n_{\varphi'}, n_{\omega}, n_{\omega'}]^T$ - вектор формирующих белых гауссовских шумов; $\mathbf{U}(t) = [W_x, W_y, W_z]^T$ - вектор управления; \mathbf{F} , \mathbf{C} , \mathbf{G} - постоянные матрицы полностью определяемые выражениями (3.5), (3.6), (3.9), (3.10), (3.14)-(3.16).

Ненулевые компоненты матриц \mathbf{F} , \mathbf{C} , \mathbf{G} имеют вид:

$$f_{1,4} = f_{2,5} = f_{3,6} = f_{4,7} = f_{5,8} = f_{6,9} = f_{10,12} = f_{11,15} = 1, \quad f_{7,7} = -(\rho_a + \rho_b),$$

$$f_{8,8} = -(\rho_a + \rho_b), \quad f_{9,9} = -(\rho_a + \rho_b), \quad f_{10,4} = -\frac{\omega_p}{c}(K_x + \tilde{K}_x),$$

$$f_{10,5} = -\frac{\omega_p}{c}(K_y + \tilde{K}_y), \quad f_{10,6} = -\frac{\omega_p}{c}(K_z + \tilde{K}_z), \quad f_{11,4} = -\frac{2\omega_{pl}}{c}\tilde{K}_x,$$

$$f_{11,5} = -\frac{2\omega_{pl}}{c}\tilde{K}_y, \quad f_{11,6} = -\frac{2\omega_{pl}}{c}\tilde{K}_z, \quad f_{12,12} = -\gamma_{\omega}, \quad f_{12,12} = -\gamma'_{\omega};$$

$$c_{10,1} = \frac{\omega_p}{c}K_x, \quad c_{10,2} = \frac{\omega_p}{c}K_y, \quad c_{10,3} = \frac{\omega_p}{c}K_z;$$

$$g_{7,1} = \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{ax}^2}, \quad g_{8,2} = \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{ay}^2}, \quad g_{9,3} = \sqrt{(\rho_a + \rho_b)\sigma_{az}^2},$$

$$g_{10,4} = \sqrt{\frac{N_{\varphi}}{2}}, \quad g_{11,5} = \sqrt{\frac{N'_{\varphi}}{2}}, \quad g_{12,6} = \sqrt{2\gamma_{\omega}\sigma_{\omega}^2}, \quad g_{13,7} = \sqrt{2\gamma'_{\omega}\sigma_{\omega}^2}.$$

Субвектор наблюдения ретранслированных сигналов СРНС от всех видимых НКА $\Xi_p(t) = [\xi_{p1}(t), \xi_{p2}(t), \dots, \xi_{pi}(t), \dots, \xi_{pl}(t)]^T$ и наблюдение (3.13) составляю вектор наблюдения:

$$\Xi(t) = [\Xi_p(t), \xi_{pl}(t)]^T. \quad (3.25)$$

Вектор (3.25) связан с вектором состояния (3.54) выражением:

$$\Xi(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}_\xi(t), \quad (3.26)$$

где: \mathbf{H} – известная постоянная матрица наблюдения, определяемая выражениями (3.12), (3.13); $\mathbf{N}_\xi(t) = [n_{p1}(t), n_{p2}(t), \dots, n_{pi}(t), \dots, n_{pl}(t), n_{pl}(t)]^T$ – вектор шумов наблюдения.

В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать критерий минимума апостериорного среднего риска при квадратичной функции потерь [37,43,171]:

$$\mathbf{X}^*(t) = \tilde{\mathbf{X}}(t) : \min_{\tilde{\mathbf{X}}} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) \varpi(t, \mathbf{X}) d\mathbf{X} \right\}, \quad (3.27)$$

где: $c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) = (\mathbf{X} - \tilde{\mathbf{X}})^T \mathbf{B}(\mathbf{X} - \tilde{\mathbf{X}})$ – квадратичная функция потерь; \mathbf{B} – заданная неотрицательно определенная матрица; $\varpi(t, \mathbf{X}) \propto p(t, \mathbf{X} | \Xi_{t_0}^t)$ – апостериорная плотность вероятности $\mathbf{X}(t)$; $\Xi_{t_0}^t = \{\Xi(\tau) : \tau \in (t_0, t)\}$ – реализация вектора наблюдения $\Xi(t)$ на интервале $\tau \in [t_0, t]$; $\tilde{\mathbf{X}}(t)$ – оценка вектора состояния.

Таким образом, задача синтеза алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении РЗ может быть сформулирована следующим образом: имея наблюдение (3.26) и располагая априорными сведениями о векторе состояния (3.24), необходимо получить оптимальную оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$, которая должна удовлетворять критерию минимума апостериорного среднего риска при квадратичной функции потерь (3.27).

3.2. Оптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

Оптимальная оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$ может быть найдена на основании апостериорной плотности вероятности $\varpi(t, \mathbf{X}_k) = p(t, \mathbf{X}_k | \xi_{p1}^t, \xi_{p2}^t, \dots, \xi_{pl}^t, \xi_{pl}^t)$, удовлетворяющей уравнению Стратоновича. Однако уравнение Стратоновича не имеет в общем виде аналитического решения.

Вместе с тем, анализируя модели радиосигналов АРЛС и ретранслированные сигналы СРНС на малых интервалах времени можно прийти к выводу, что возможно представление модели вектора состояния в виде квазислучайного процесса. Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса приведена в Приложении Д.

Использование модели вектора состояния в виде квазислучайного процесса позволяет обоснованно перейти от нелинейной системы дифференциальных уравнений к системе линейных уравнений с постоянными коэффициентами. Это открывает возможности аналитического решения уравнения Стратоновича.

С учетом разработанной модели (Д.6) апостериорная плотность вероятности удовлетворяет уравнению Стратоновича [171]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varpi(t, \mathbf{X}_k) = \varpi(t, \mathbf{X}_k) \left\{ F(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - F_X(t) \right\}, \quad (3.28)$$

где:

$$\begin{aligned} F(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) &= N_p^{-1} \left\{ 2\xi_p(t) s_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - \right. \\ &\left. - s_p^2(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right\} + N_{pl}^{-1} \left\{ 2\xi_{pl}(t) s_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - \right. \\ &\left. - s_{pl}^2(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right\} = \\ &= F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) + F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}); \end{aligned}$$

$$F_X(t) = \int \left(F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) + F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right) \varpi(t, \mathbf{X}_k) d\mathbf{X}_k.$$

Решение уравнения (3.28) имеет вид:

$$\begin{aligned} \varpi(t+T, \mathbf{X}_k) = & C_1 \varpi(t_k, \mathbf{X}_k) \times \\ & \times \exp \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau \right\}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

где: C_1 – нормировочная постоянная; t_k – момент начала накопления сигнала; T – время накопления сигнала.

Совместный процесс $\mathbf{Z}^T = [\mathbf{X}^T, \Xi^T]$ является марковским [171], тогда искомая апостериорная плотность вероятности в момент времени $t_k + T = t_{k+1}$ может быть получена на основе решения рекуррентного уравнения Стратоновича [171]:

$$\varpi(t_{k+1}, \mathbf{X}_{k+1}) = C_2 \int \pi[\mathbf{X}_{k+1} | \mathbf{X}_k] \varpi(t+T, \mathbf{X}_k) d\mathbf{X}_k, \quad (3.30)$$

где: C_2 – нормировочная постоянная, $\pi[\mathbf{X}_{k+1} | \mathbf{X}_k]$ – плотность вероятности перехода марковского процесса.

Оптимальная по критерию (3.27) оценка вектора состояния определяется выражением:

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \int \mathbf{X}_{k+1} \varpi(t_{k+1}, \mathbf{X}_{k+1}) d\mathbf{X}_{k+1}, \quad (3.31)$$

и представляет собой апостериорное математическое ожидание \mathbf{X}_{k+1} .

Соотношения (3.30) и (3.31) позволяют последовательно при $k = 0, 1, 2, \dots$ найти значения апостериорной плотности вероятности оцениваемого процесса $\mathbf{X}(t)$ и при

помощи процедуры определения глобального максимума функции многих переменных получить оптимальные по заданному критерию оценки вектора состояния.

3.3. Квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

Практика применения оптимальных АКОИ [172] показывает, что их реализация связана со значительными трудностями, прежде всего вычислительного характера. Использование даже современных компьютерных систем не позволяет применить оптимальные АКОИ в КБСС СРЗ КТ. Выходом из ситуации может быть переход к квазиоптимальным АКОИ, которые возможно получить путем гауссовской аппроксимации $\varpi(t, \mathbf{X}_k) = p(t, \mathbf{X}_k | \xi_{p1}^t, \xi_{p2}^t, \dots, \xi_{pl}^t, \xi_{pl}^t)$.

Получение $\mathbf{X}^*(t_k + T)$, в этом случае, основано на поиске точки, в которой функция:

$$F = \int_{t_k}^{t_k+T} F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau + \ln(\varpi(t+T, \mathbf{X}_k)) \quad (3.32)$$

имеет глобальный максимум.

При использовании гауссовского приближения апостериорное распределение $\varpi(t+T, \mathbf{X}_k)$ имеет вид:

$$\varpi(t+T, \mathbf{X}_k) = N\{\mathbf{X} - \mathbf{X}^*, \mathbf{R}(t_k)\}, \quad (3.33)$$

где $\mathbf{R}(t_k)$ – ковариационная матрица апостериорных ошибок оценивания компонент вектора состояния.

Матрица $\mathbf{R}(t_k)$ может быть получена из уравнения:

$$\int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\})}{\partial \mathbf{X}_k} \right] d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{пл}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\})}{\partial \mathbf{X}_k} \right] d\tau - \mathbf{R}^{-1}(t_k) [\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_k^*] = 0. \quad (3.34)$$

Раскладывая (3.34) в ряд Тейлора в окрестности точки \mathbf{X}_k^* и учитывая первые два члена разложения, получим квазиоптимальный алгоритм первичной комплексной обработки ретранслированных сигналов СРНС и сигналов АРЛС:

$$\mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1}) = \mathbf{X}_k^* + \mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) \times \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{пл}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \right\}, \quad (3.35)$$

$$\mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) = \left\{ \mathbf{R}^{-1}(t_k) - \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right) \left[\int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{пл}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \right] \right\}^{-1}. \quad (3.36)$$

Оценка $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ определяется выражением:

$$\mathbf{X}^*(t_{k+1}) = \Phi_{XX} \mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1}) + \Psi \mathbf{U}(t_k), \quad (3.37)$$

Входящая в (3.36) матрица апостериорных вторых центральных моментов второго порядка $\mathbf{R}(t_{k+1})$ определяется выражением:

$$\mathbf{R}(t_{k+1}) = \Phi_{XX} \mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) \Phi_{XX}^T + \mathbf{B}_{XX}, \quad (3.38)$$

где: $\mathbf{B}_{XX} = \Gamma_X \Gamma_X^T$, Γ_X – известная матрица возмущений, определяемая в соответствии с [171] на основе матрицы \mathbf{G} ; Ψ – известная матрица управления, определяемая в соответствии с [171] на основе матрицы \mathbf{C} ; Φ_{XX} – известная фундаментальная матрица, определяемая на основе решения уравнения [171]:

$$\frac{\partial \Phi(t, t_0)}{\partial t} = \mathbf{F} \Phi(t, t_0), \quad \Phi(t_0, t_0) = \mathbf{I}, \quad (3.39)$$

где: \mathbf{I} – единичная матрица.

В качестве начальных значений в выражениях (3.37) и (3.38) используется оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1})$ и матрица апостериорных вторых центральных моментов второго порядка $\mathbf{R}(t_k | t_{k+1})$, которые получены на основании наблюдений в соответствии с (3.35) и (3.36).

Особенностью полученного квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки ретранслированных сигналов СРНС и сигналов АРЛС (3.35)-(3.38) является то, что в модели сигналов (Д.7) и (Д.8) входят функции $L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}$. Тогда, входящий в (3.35) и (3.36) логарифм функционала правдоподобия (ЛФП) и его производная, может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
& \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{pl} \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau = \\
& = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_1^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_2^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau. \tag{3.40}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right) \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{pl} \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \right\} = \\
& = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_1^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} + \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*} \right]^T \Phi_1^T \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \right]^T d\tau + \\
& + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_2^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} + \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*} \right]^T \Phi_2^T \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \right]^T d\tau, \tag{3.41}
\end{aligned}$$

где:

$$\mathbf{Y}_{pk}^* = \left[d_{\Sigma}^*, \dot{d}_{\Sigma}^*, \varphi_p^*, \Delta \omega_p^* \right], \quad \mathbf{Y}_{plk}^* = \left[d_{pl}^*, \dot{d}_{pl}^*, \varphi_{pl}^*, \Delta \omega_{pl}^* \right] \quad - \quad \text{векторы оценок}$$

параметров, непосредственно измеряемых (РНП);

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= \frac{\partial F_p \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}; \\
\Phi_2 &= \frac{\partial F_{pl} \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}.
\end{aligned}$$

Структурная схема модуля комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах радиозонда (МПКОИ ПК), реализующая синтезированный квазиоптимальный алгоритм приведена на рис. 3.1.

В составе схемы МПКОИ ПК можно выделить:

- многомерный дискриминатор СРНС (МД-Р), включающий отдельные дискриминаторы количество которых соответствует числу одновременно принимаемых ретранслированных сигналов НКА;
- дискриминатор АРЛС (Д-РЛ);
- модуль вычисления оценки (МВО), на выходе которого формируется оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$.

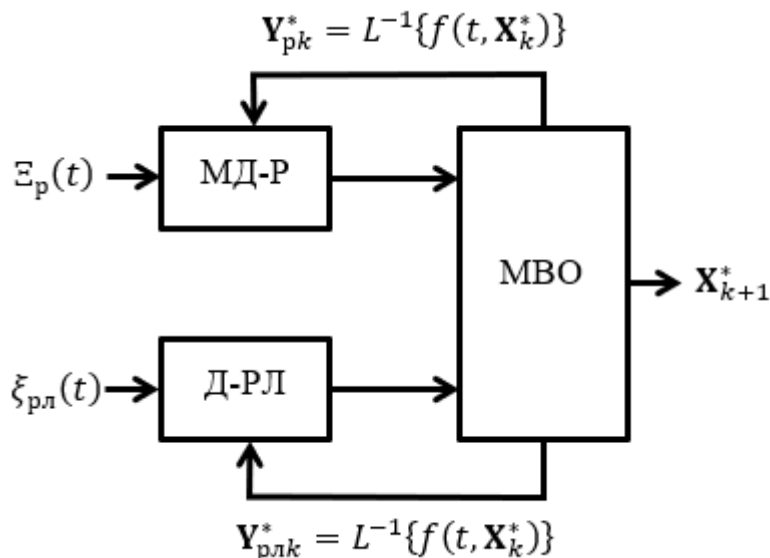


Рисунок 3.1 - Структурная схема модуля первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах радиозонда

Дискриминаторы МД-Р и Д-РЛ аналогичны по своему составу и назначению элементов. На рис. 3.2 представлена структурная схема одного дискриминатора Д-Р, входящего в МД-Р.

Дискриминатор Д-Р включает в себя множитель, интегратор, модуль формирования опорного сигнала (МФОС). Дискриминатор выполняет операцию

$$\int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p \left(t, L \left\{ f \left(t, \mathbf{X}_k^* \right) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \quad \text{в выражении (3.35) для формирования оценки}$$

$\mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1})$. В состав Д-Р конструктивно включен модуль прямого преобразования координат (МППК), выполняющий операцию $L\{f(t, \mathbf{Y}_k)\}$.

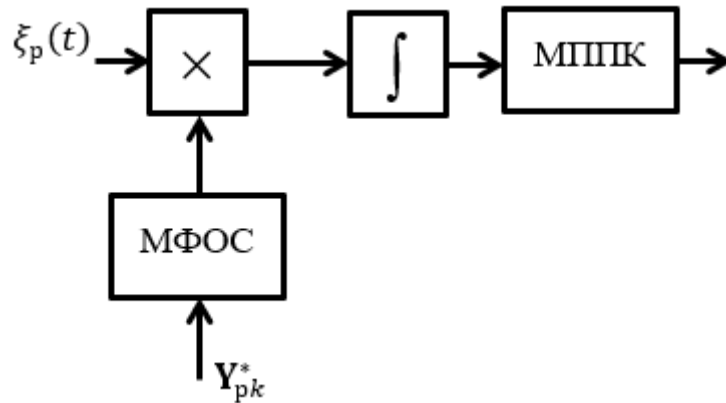


Рисунок 3.2. Структурная схема дискриминатора Д-Р

Модуль вычисления оценки (МВО) включает в себя:

- сумматоры;
- модуль весового суммирования;
- модуль вычисления прогноза (МВП).

Структурная схема МВО приведена на рис. 3.3.

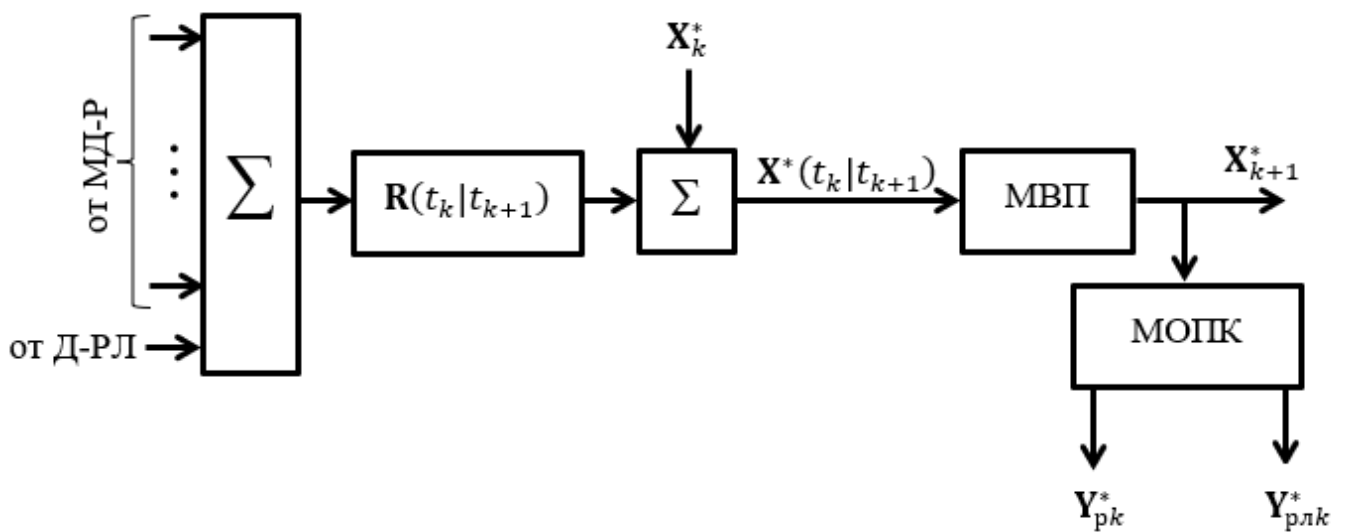


Рисунок 3.3. Структурная схема модуля вычисления оценки

Первый сумматор объединяет выходные сигналы МД-Р и Д-РЛ. Модуль весового суммирования осуществляет операцию $\mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) \times \{\cdot\}$ в выражении (3.35). На выходе второго сумматора формируется оценка $\mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1})$, которая подается на МВП. Модуль вычисления прогноза формирует выходную оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ в соответствии с (3.37). Операции $\mathbf{Y}_{pk}^* = L^{-1}\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\}$ и $\mathbf{Y}_{plk}^* = L^{-1}\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\}$, выполняемые в МВО необходимы для формирования опорных сигналов в МД-Р и Д-РЛ. В условиях сложной помеховой обстановки, когда высока вероятность срыва слежения за параметрами, временного пропадания сигналов и т.п., наличия обратных связей по опорным сигналам позволяет заметно повысить достоверность данных радиозондирования.

На рис.3.2 и рис.3.3 не показаны элементы, обеспечивающие формирование значений $\mathbf{R}(t_k | t_{k+1})$ и $\mathbf{R}(t_{k+1})$.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3:

В ходе исследований, проведенных в главе 3, были получены следующие основные результаты:

1. Формализована постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.
2. Обоснованно проведено упрощение математической модели динамики компонент вектора состояния путем представления этой модели в виде многомерного квазислучайного процесса.
3. Разработан оптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда от систем радиозондирования радиолокационного и спутникового типа.

4. Разработан квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда от систем радиозондирования радиолокационного и спутникового типа основанный на способе гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности оцениваемого векторного процесса.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие **выводы:**

1. В рамках методов марковской теории оценивания случайных процессов формализована постановка задачи исследований.

Постановка задачи заключается в:

- формировании математических моделей радиосигналов и помех комплексированных систем радиозондирования радиолокационного и спутникового типа;

- выборе критерия оптимизации и корректной постановке задачи оптимизации.

2. Особенностью алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах радиозонда является то, что они получены применительно к радиозонду, на котором устанавливается ретранслятор сигналов СРНС и без учета средства его подъема (газонаполненная оболочка, беспилотный летательный аппарат).

3. Задача синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда решалась в интересах обеспечения достоверности данных радиозондирования путем:

- снижения (в пределе - полного устранения) числа «пробелов» при сопровождении радиозонда в атмосфере;

- обеспечения устойчивой работы системы радиозондирования при малых отношениях сигнал/шум на входах приемных устройств комплексной базовой станции слежения.

4. Оптимальный алгоритм первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах радиозонда является одноэтапным, что существенно экономит вычислительные ресурсы комплексной базовой станции

слежения. Получение выходных данных осуществляется по радиосигналам от всех видимых навигационных космических аппаратов спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС/GPS и ответным радиосигналам аэрологической радиолокационной станции. Без существенных изменений алгоритм может быть доработан с целью приема и обработки сигналов СРНС БЭЙДОУ и Galileo.

5. С использованием метода гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности оцениваемого векторного процесса осуществлен корректный переход к квазиоптимальным комплексным первичным алгоритмам обработки информации о пространственных координатах радиозонда. На основе полученных квазиоптимальных алгоритмов предложена схема модуля МПКОИ ПК. Особенностью МПКОИ ПК является наличие обратных перекрестных связей, которые в условиях сложной помеховой обстановки, когда высока вероятность срыва слежения за параметрами, временного пропадания сигналов и т.п., позволяют заметно повысить достоверность данных радиозондирования.

4. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В п.1.1 показано, что достоверность метеоинформации определяется точностью измерения метеопараметров атмосферы и условиями эксплуатации метеоизмерителей. Условия эксплуатации комплексной системы радиозондирования атмосферы определяются, в первую очередь, помеховой обстановкой в районе проведения радиозондирования атмосферы. Помехоустойчивость является важным свойством системы, т.к. исполнение комплексной системы радиозондирования в мобильном варианте предполагает ее применение в различных географических районах и неисследованной помеховой обстановкой.

В рамках задачи комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах радиозонда количественными характеристиками достоверности метеоинформации являются помехоустойчивость и точность определения пространственных координат РЗ.

Для количественной оценки помехоустойчивости и точности будем использовать величины среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок оценивания компонент вектора состояния, а именно – СКО ошибки оценивания высоты σ_z и скорости σ_{V_z} подъема РЗ.

Помехоустойчивость характеризует способность синтезированной комплексной системы противостоять мешающему действию радиопомех. Для ее количественной оценки целесообразно исследовать характер изменения СКО ошибки оценивания высоты σ_z подъема радиозонда в различных конфигурациях системы и при различной помеховой обстановке в районе радиозондирования.

Расчеты характеристик точности и помехоустойчивости получены с использованием системы MatLab.

4.1. Методики оценки помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

На основании синтезированного алгоритма и в соответствии с [171] были разработаны методики анализа потенциальных и фактических достижимых характеристик помехоустойчивости и точности алгоритма КПОИ о пространственном положении РЗ.

Методика оценки потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности основана на получении численных значений матриц $\mathbf{R}(t_{k+1})$. В целом методика расчета потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности алгоритмов КПОИ заключается в следующем.

На основании разработанных моделей полезных сигналов, векторов наблюдения и состояния вычисляются элементы матриц $\frac{\partial \mathbf{Z}_1(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}}$ и $\frac{\partial \mathbf{Z}_2(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}}$, где \mathbf{E} – вектор ошибок оценивания.; $\mathbf{Z}_1(\mathbf{E})$ и $\mathbf{Z}_2(\mathbf{E})$ – дискриминационные характеристики дискретно-непрерывного (СРНС) и импульсного (АРЛС) сигналов, определяемые выражениями:

$$\mathbf{Z}_1(\mathbf{E}) = M \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} \Phi_1 d\tau \Big|_{\mathbf{E}} \right\}, \quad (4.1)$$

$$\mathbf{Z}_2(\mathbf{E}) = M \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_{in}}^{t_{in} + \tau_n} \Phi_2 d\tau | \mathbf{E} \right\}. \quad (4.2)$$

Вычисляются элементы матриц Φ_{XX} , $\Phi_{\Xi X}$, \mathbf{B}_{XX} , $\mathbf{B}_{X\Xi}$, $\mathbf{B}_{\Xi\Xi}$.

В соответствии с выражением:

$$\mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) = \left\{ \mathbf{R}^{-1}(t_k) - \mathbf{L} \left[\frac{\partial \mathbf{Z}_1(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} + \frac{\partial \mathbf{Z}_2(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} \right]_{\mathbf{E}} \mathbf{L}^T \right\}^{-1}, \quad (4.3)$$

вычисляются значения матрицы апостериорных вторых центральных моментов при наблюдении (3.25) на момент времени t_k .

Затем в соответствии с (3.38) вычисляются значения матрицы апостериорных вторых центральных моментов на момент времени $t_k + T$. Повторяя вычисления для каждого такого интервала, можно получить зависимости точности оценивания компонент вектора состояния, по которым оценить помехоустойчивость КПОИ в различных конфигурациях системы комплексной обработки информации о ПК радиозонда. Для устранения зависимости $\mathbf{R}(t_{k+1})$ от флуктуаций амплитуды входных сигналов должна проводиться дополнительно операция усреднения по множеству реализаций $A(t)$. Чтобы не проводить это усреднение амплитуду входных сигналов будем считать равной $A(t) = \sigma_a \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

Использование рассмотренной методики позволяет оценить предельно допустимую (потенциальную) точность измерения пространственных координат радиозонда, оценить помехоустойчивость и осуществить сравнение различных вариантов конфигурации информационной части СРЗ КТ.

Методика оценки фактически достижимых характеристик точности и помехоустойчивости является важной составной частью анализа алгоритмов КПОИ. Необходимость этой оценки объясняется тем, что при синтезе алгоритмов КПОИ

используется ряд ограничений и допущений, которые призваны упростить практическую реализацию алгоритмов КПОИ с учетом практического применения и реализации комплексной системы радиозондирования атмосферы. В частности, синтез квазиоптимальных алгоритмов КПОИ был осуществлен с применением метода гауссовской аппроксимации АПВ. Кроме этого, методика оценки потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости в принципе не учитывает явления, связанные с нелинейной статистической динамикой динамических следящих систем в аномальных режимах функционирования. Не могут быть полностью учтены и точно описаны все параметры математических моделей полезных сигналов, помех, информационных и сопутствующих процессов. Это связано с ограниченным объемом экспериментальных данных, с одной стороны, и стремлением получить более простые модели для решения задачи синтеза алгоритмов КПОИ, с другой стороны.

Для оценки фактически ожидаемых характеристик системы комплексной обработки информации о ПК радиозонда наиболее предпочтительным, как с точки зрения экономии вычислительных затрат, так и с точки зрения учета возможностей нелинейной статистической динамики фактических ошибок оценивания, является метод статистического моделирования.

Суть методики оценки фактически достижимых характеристик качества алгоритмов КПОИ сводится к следующему.

1. Используя (3.24), (3.26) формируются действительные значения вектора состояния $\mathbf{X}_\delta(t)$ $\mathbf{X}_\delta(t)$.

2. Формируются действительные значения наблюдаемых процессов в соответствии с:

$$\xi_{p\delta}(t) = s_{p\delta}(t, \mathbf{X}_\delta(t_k), \theta_k) + n_{p\delta}(t), \quad (4.4)$$

$$\xi_{p\lambda\delta}(t) = s_{p\lambda\delta}(t, \mathbf{X}_\delta(t_k)) + n_{p\lambda\delta}(t). \quad (4.5)$$

3. Вычисляются оценки вектора состояния в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1}) = & \Phi_{XX} \mathbf{X}^*(t_k) + \Phi_{XX} \mathbf{R}_\delta(t_k | t_{k+1}) \times \\ & \times \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_1^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_2^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \right\} + \Psi \mathbf{U}(t_k). \end{aligned} \quad (4.6)$$

4. Вычисляются действительные значения матрицы вторых апостериорных центральных моментов

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_\delta(t_{k+1}) = & \Phi_{XX} \times \\ & \times \left\{ \mathbf{R}_\delta^{-1}(t_k) - \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_1^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} + \frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \left[\left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*} \right]^T \Phi_1^T \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_{pk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \right]^T d\tau + \right. \\ & \left. + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\Phi_2^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} + \frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \left[\left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*} \right]^T \Phi_2^T \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_{plk}^*}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T \right]^T d\tau, \right\}^{-1} \times \\ & \times \Phi_{XX}^T + \mathbf{B}_{XX}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Наиболее трудоемкими, с точки зрения моделирования, являются процедуры вычисления первой и второй производных функций Φ_1 и Φ_2 , входящих в (4.6) и (4.7), по компонентам вектора состояния.

4. Рассчитываются ошибки оценивания

$$\mathbf{E}(t_k) = \mathbf{X}_\delta(t_k) - \mathbf{X}^*(t_k). \quad (4.8)$$

5. Определяются статистические характеристики (4.8) - математическое ожидание и дисперсия ошибок оценивания.

Во избежание необходимости дополнительного усреднения по амплитуде, амплитуды входных сигналов считаются равными $A(t) = \sigma_a \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

На основании разработанных методик была проведена оценка потенциальных и фактически ожидаемых характеристик помехоустойчивости и точности АПКОИ ПК РЗ.

4.2. Оценка потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

Расчет потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности осуществлялся применительно к наихудшему с точки зрения слежения за параметрами сигнала случаю, соответствующему такому взаимному расположению радиозонда, НКА и БСС, когда значение коэффициента геометрии превышает единицу. Расчеты проводились для типовых значений параметров сигналов СРНС и АРЛС, приведенных в табл. 4.1. Начальные значения дисперсий ошибок оценивания выбирались из условия необходимости осуществления режима слежения, т.е. пребывания текущих значений ошибок оценивания компонент вектора состояния в пределах линейных участков сечений многомерной дискриминационной характеристики [171].

На рис.4.1 и рис.4.2 представлены зависимости СКО ошибок оценивания высоты подъема радиозонда и скорости ее изменения для различных вариантов конфигурации модуля комплексной обработки информации (МКПОИ ПК) о пространственных координатах радиозонда. Представленные зависимости позволяют судить о том, какой выигрыш дает использование дополнительной

информации от АРЛС при оценивании компонент вектора состояния в штатном режиме работы МКПОИ ПК (т.е. при отношении сигнал/шум СРНС $q_c = 10^{-3}$ и отношении сигнал/шум АРЛС $q_{pl} = 10$). Анализ этих зависимостей позволяет утверждать, что в условиях нормальной помеховой обстановки для СРНС и АРЛС выигрыша от комплексирования по точности определения высоты и скорости подъема радиозонда, как и следовало ожидать, практически нет. В установившемся режиме для конфигураций МКПОИ ПК ГЛОНАСС+GPS+АРЛС и ГЛОНАСС+GPS разность СКО составляет около 2 м, а скорости подъема – около 0,19 м/с.

Таблица 4.1 – Типовые значения параметров сигналов СРНС и АРЛС

Параметр	СРНС ГЛОНАСС/GPS	АРЛС
Несущая частота	1602,56-1615,5 МГц <u>1246-1256 МГц</u> 1575,42 МГц 1227,6 МГц	1680 МГц
Длительность импульса	-	1 мкс
Период повторения пачек запросных импульсов	-	2,56 с
Частота ретрансляции сигналов СРНС	403 МГц	-
Длительность импульса модулирующей ПСП	<u>2000 нс</u> 980 нс	-
Длина ПСП дальномерного кода	<u>100000</u> 204081	-

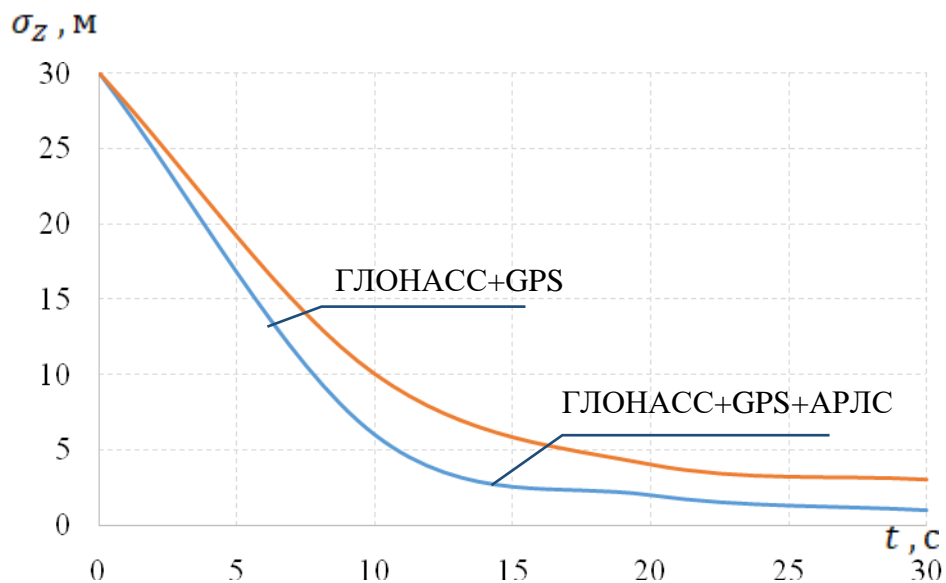


Рисунок 4.1 – Временные зависимости СКО ошибок оценивания высоты подъема радиозонда в различных конфигурациях МКПОИ ПК

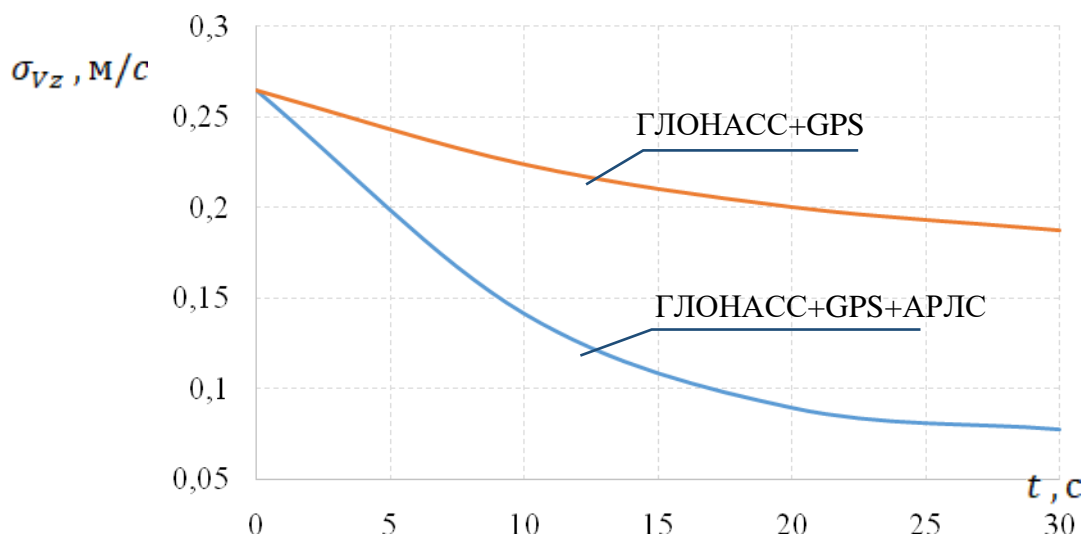


Рисунок 4.2 – Временные зависимости СКО ошибок оценивания скорости подъема радиозонда в различных конфигурациях МКПОИ ПК

В условиях усложненной и сложной помеховой обстановки для СРНС и АРЛС выигрыш от комплексирования становится более ощутимым по сравнению с штатным режимом работы. На рис. 4.3 и рис.4.4 представлены характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для СРНС и АРЛС.

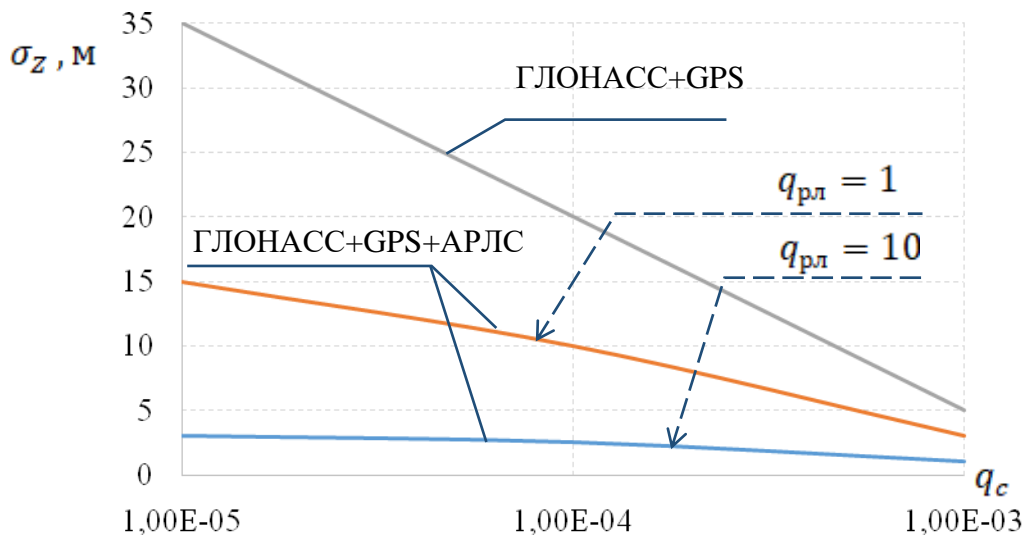


Рисунок 4.3 - Характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для СРНС

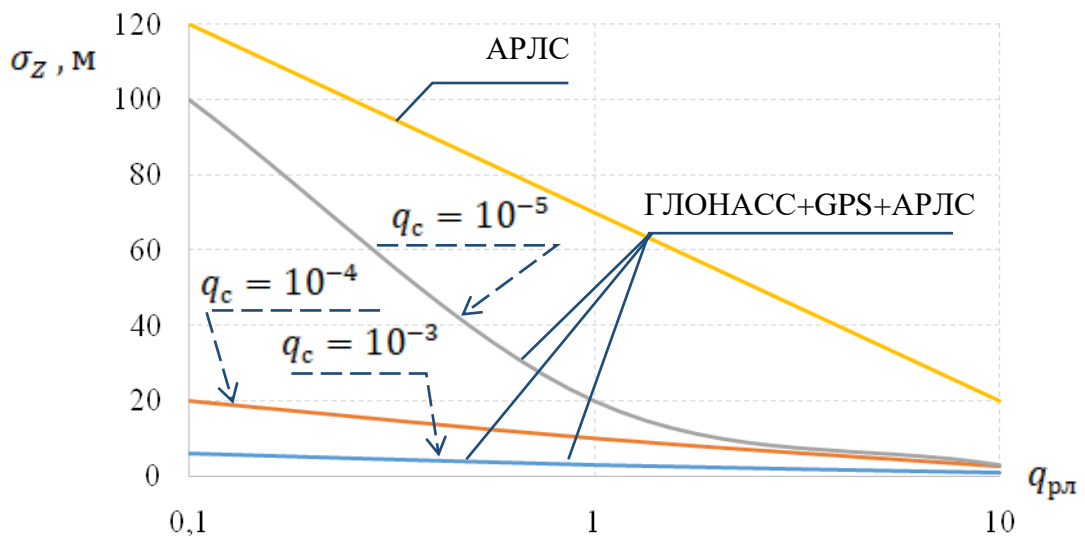


Рисунок 4.4 – Потенциальные характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для АРЛС

Установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ увеличивается примерно в 2,5 раза и составляет 2,5 м, а при $q_c = 10^{-5}$ – увеличивается примерно в 3 раза и составляет около 3 м. При этом АРЛС работает в штатном режиме ($q_{рл} = 10$). В не комплексном варианте работы

системы, т.е. при отсутствии сигналов СРНС, установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ составляет 20 м, а для $q_c = 10^{-5}$ – 35 м. Таким образом, выигрыш в использовании комплексных алгоритмов в 8-10 раз очевиден.

Аналогичные результаты получены и для оценки выигрыша комплексирования АРЛС с СРНС. В не комплексном режиме использования АРЛС установившееся значение СКО составляет 70 м (для $q_{pl} = 1$) и более 120 м ($q_{pl} = 0,1$). Выигрыш от комплексирования в этом случае еще более очевиден. СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда (при $q_c = 10^{-3}$) для комплексного использования АРЛС в более чем 20 раз меньше, чем для не комплексного в условиях работы АРЛС в сложной помеховой обстановке.

При воздействии помех одновременно для АРЛС и СРНС комплексная обработка информации также дает выигрыш. В условиях усложненной и сложной помеховой обстановки для $q_c = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ и $q_{pl} = 0,1 \dots 1$ установившееся значение СКО оценивания высоты подъема радиозонда изменяется в пределах от 10 до 100 м. При этом, даже в сложной помеховой обстановке синтезированный алгоритм позволяет получить СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда не превышающее значение 100 м.

Проведенные исследования потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности показали, что при функционировании системы в условиях сложной помеховой обстановки выигрыш от комплексирования наиболее значим для АРЛС (канала РК-2).

4.3. Оценка фактически достижимых характеристик помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма первичной комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда

Используя разработанную в п.4.1. методику, была проведена оценка фактически достижимых характеристик помехоустойчивости и точности АПКОИ ПК РЗ.

Зависимости фактических СКО ошибок оценивания высоты подъема радиозонда от отношения сигнал/шум для СРНС $q_c = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ и АРЛС $q_{рл} = 0,1 - 10$ для случаев комплексной и не комплексной обработки информации, приведены на рис. 4.5 и рис.4.6.

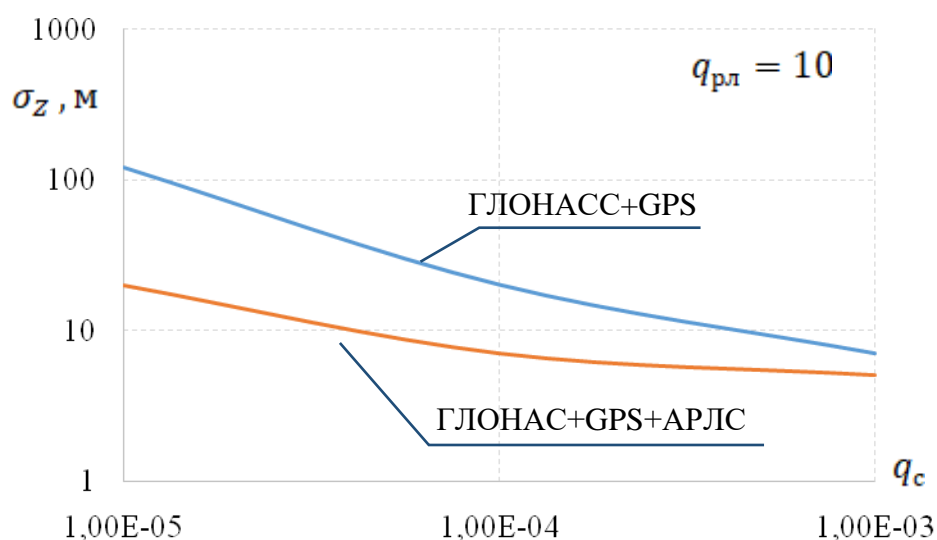


Рисунок 4.5 – Фактические характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для СРНС

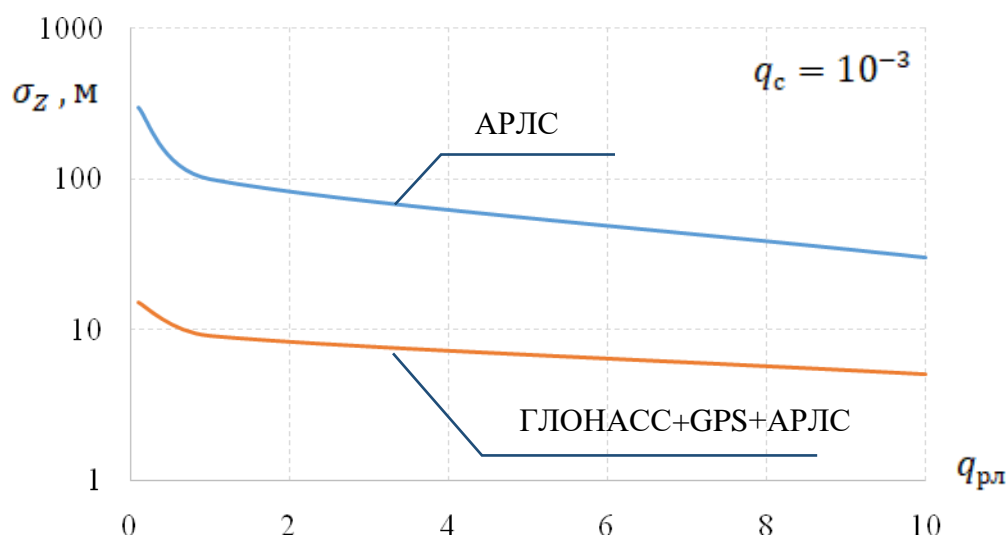


Рисунок 4.6 – Фактические характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для АРЛС

Результаты моделирования в целом подтверждают выводы, сделанные в п.4.2. Выигрыш от комплексирования наблюдается при малых отношениях сигнал/шум, т.е. в условиях действия помех. Для штатной помеховой обстановки значения СКО для комплексного и не комплексного варианта использования СРЗ КТ практически совпадают. Расчеты показали, что для значений отношения сигнал/шум менее $q_c = 10^{-5}$ в не комплексном варианте использования МКОИ фактически наступает срыв слежения за радиозондом, чего не происходит при комплексной обработке радиосигналов АРЛС (РК-2) и СРНС (РК-1). При использовании комплексных алгоритмов наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК (СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается примерно до 20 м).

Для АРЛС (РК-2) в штатной помеховой обстановке значения СКО для комплексного и не комплексного варианта использования отличаются на величину около 20 м. По сравнению со сложной для АРЛС помеховой обстановки эта величина не большая. Существенный выигрыш от применения комплексных алгоритмов наблюдается, как и следовало ожидать, при уменьшении значений отношения сигнал/шум $q_{рл}$. В не комплексном варианте уменьшение отношения $q_{рл}$

приводит к значительному росту СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда вплоть до срыва слежения за радиозондом. При использовании комплексных алгоритмов, при штатной помеховой обстановке для СРНС, наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК, при этом СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается до 20 м.

Таким образом, использование алгоритмов комплексной первичной обработки радиосигналов АРЛС и СРНС позволяет обеспечить в условиях сложной помеховой обстановки решение задачи надежного сопровождения радиозонда. Это обстоятельство является существенным фактором повышения помехоустойчивости всей системы радиозондирования атмосферы и возможности ее применения в условиях сложной помеховой обстановки, как при воздействии естественных, так и, возможно, искусственных радиопомех.

4.4. Оценка степени критичности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений

Практическое применение алгоритмов комплексной первичной обработки радиосигналов АРЛС и СРНС требует оценки их робастности, или иначе говоря, устойчивости к отклонению параметров моделей радиосигналов и условий радиозондирования от расчетных.

В настоящей работе под робастностью понимается нечувствительность синтезированных алгоритмов функционирования МПКОИПК к неточности задания параметров полезных радиосигналов и математических моделей информационных и сопутствующих процессов (см. п.4.1).

Определение степени робастности синтезированных квазиоптимальных алгоритмов выполнялось методами статистического моделирования с использованием методики, изложенной в п.4.1. Оценка степени критичности МПКОИ ПК проводилась по отношению к неточности задания:

- коэффициента, характеризующего ширину спектра флуктуаций частоты задающего генератора передатчика радиозонда;
- значения априорной дисперсии флуктуаций частоты задающего генератора передатчика радиозонда;
- значения масштаба турбулентности атмосферы.

Степень критичности алгоритма к изменению значения коэффициента, характеризующего ширину спектра флуктуаций частоты ЗГ передатчика РЗ представлена на рис.4.7. Расчеты показывают, что отклонение значений коэффициента, характеризующего ширину спектра флуктуаций частоты задающего генератора передатчика радиозонда от расчетных в сторону уменьшения в 2 раза приводит к уменьшению значения СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда примерно на 1,5%.

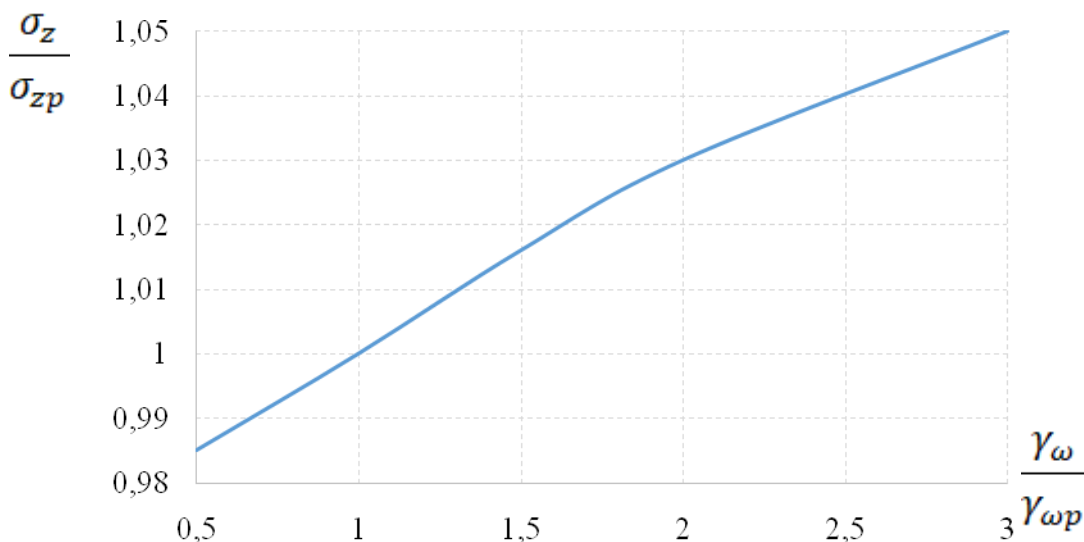


Рисунок 4.7 – Критичность АПКОИ ПК к изменению значения коэффициента, характеризующего ширину спектра флуктуаций частоты ЗГ передатчика РЗ

Отклонение значений коэффициента в сторону его увеличения в 3 раза приводит к увеличению СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда примерно на 5%.

Степень критичности алгоритма к изменению значения априорной дисперсии флуктуаций частоты ЗГ передатчика РЗ представлена на рис.4.8. Расчеты показывают, что отклонение значений априорной дисперсии флуктуаций частоты задающего генератора передатчика радиозонда от расчетных в сторону уменьшения в 2 раза приводит к уменьшению значения СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда примерно на 2,5%. Отклонение значений дисперсии в сторону его увеличения в 1,5 раза приводит к увеличению СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда примерно на 6%. Проведенный анализ показал, что МПКОИПК также практически не критичен к изменению значения априорной дисперсии флуктуаций частоты ЗГ передатчика РЗ от расчетных значений.

Таким образом, анализ показал, что МПКОИПК практически не критичен к изменению параметров модели ЗГ передатчика РЗ.

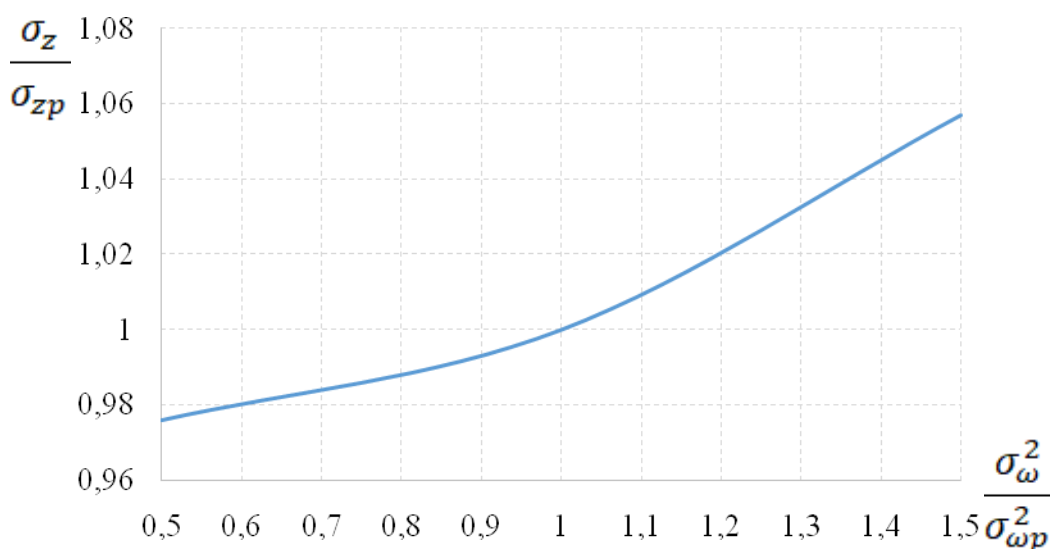


Рисунок 4.8 – Критичность АПКОИ ПК к изменению значения априорной дисперсии флуктуаций частоты ЗГ передатчика РЗ

Значения коэффициентов ρ_a и ρ_b в моделях (3.16) зависят от масштаба турбулентности атмосферы L [43]:

$$\rho_a = \frac{V}{L} + \mu, \quad \rho_b = \frac{V}{L} \mu, \quad \sigma_a^2 = \mu^2 \frac{V}{L} \sigma_u^2 \left(\mu + \frac{V}{L} \right)^{-1}, \quad (4.9)$$

где: V - скорость подъема радиозонда; μ – параметр, зависящий от типа объекта и условий его движения в атмосфере; σ_u^2 – СКО флуктуаций скорости подъема радиозонда, обусловленных ветром.

Влияние неточного задания статистических характеристик состояния атмосферы, а именно, значения масштаба турбулентности атмосферы и связанных с ними значений параметров модели динамики компонент вектора состояния, приведено на рис. 4.9.

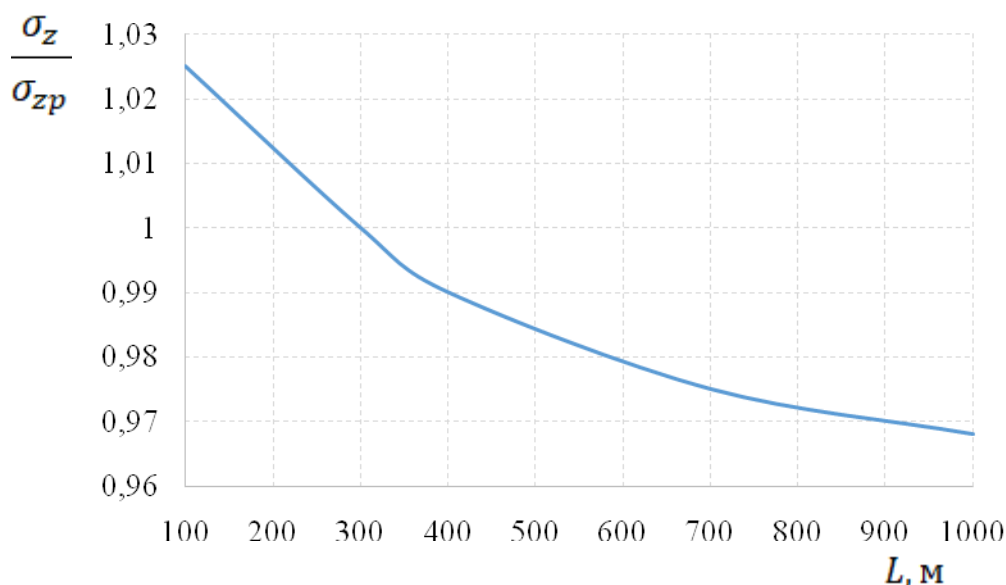


Рисунок 4.9 – Степень критичности алгоритма к изменению расчетного значения масштаба турбулентности атмосферы

Изменение масштаба турбулентности в пределах от 100 м до 1000 м приводит к незначительному диапазону отклонений СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда. Так при масштабе турбулентности 100 м отклонение СКО

составляет 2,5%, а при масштабе турбулентности 1000 м – 3,2%. Таким образом, при изменении масштаба турбулентности атмосферы в указанных пределах значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда будет практически равно расчетному. Кроме этого, графическая зависимость, представленная на рис.4.9 показывает, что при уменьшении масштаба турбулентности атмосферы, увеличивается СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда, что находится в соответствии с физическими предпосылками.

Таким образом, проведенный анализ степени критичности МПКОИ ПК к изменению параметров моделей полезных сигналов и моделей информационных и сопутствующих процессов показал, что отклонения параметров этих моделей от расчетных значений не приводят к существенному ухудшению качества оценивания компонент вектора состояния. Это еще раз подтверждает достоинства комплексной обработки информации и возможность практической реализации комплексной системы радиозондирования.

4.5. Рекомендации по размещению и применению комплексной системы радиозондирования атмосферы

Технический облик СРЗ КТ рассмотрен в гл.2. Там же приведены основные требования к системе. Исходя из теоретических исследований, проведенных в гл.2. требуется сформулировать основные рекомендации по размещению и применению СРЗ КТ.

СРЗ КТ должна располагаться на местности (в стационарном варианте) или в кузове автомобиля (в мобильном варианте).

Расположение СРЗ КТ на местности должно учитывать естественный рельеф, здания и другие конструкции, мешающие проведению радиозондирования. Основная особенность СРЗ КТ состоит в наличии двух антенных систем:

- антенны для приема ретранслированных радиосигналов СРНС (АС-1);
- антенны запроса и приема ответных радиосигналов РЗ (АС-2).

Размещение АС-1 также должно обеспечивать устойчивую связь с РЗ. В радиусе 100 м от АС-1 не должно быть препятствий высотой более 3 м, а в радиусе 500 м – более 15 м, в связи с чем АС-1 рекомендуется устанавливать на крыше здания. Минимальное расстояние от АС-1 до линии электропередач должно составлять не менее двух длин антенны. Место установки АС-1 должно выбираться таким образом, чтобы зона радиотени, создаваемая естественным рельефом (холмы, лесные массивы и т.д.), зданиями и сооружениями не превышала 10° относительно горизонта. Примерный вид АС-1 приведен на рис. 4.10.

Размещение АС-2 должно обеспечивать нормальную радиолокационную видимость верхней полусферы пространства и точки (площадки) подготовки и выпуска РЗ. АС-2 также может устанавливаться на крыше здания. Углы закрытия горизонта естественным рельефом (холмы, лесные массивы и т.д.) не должны быть более 3° . Антенная система АС-2 должна быть закрыта радиопрозрачным обтекателем для предотвращения воздействия на нее неблагоприятных внешних факторов. Примерный вид АС-2 приведен на рис. 4.11.



Рисунок 4.10. Внешний вид антенной системы АС-1

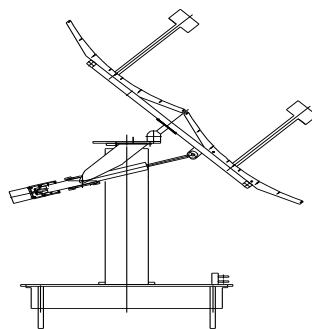


Рисунок 4.11. Внешний вид антенной системы АС-2

Стационарный вариант размещения СРЗ КТ должен учитывать возможности имеющихся станций АЭ. Это связано с тем, что СРЗ КТ может использовать уже эксплуатируемые на конкретной АЭ АРЛС (МАРЛ-А, ВЕКТОР-М, РАМ-2 и др.). На рис. 4.12 приведен пример размещения АС-1 и АС-2 на территории АЭ.

Рабочее место аэролога должно находиться в отапливаемом, проветриваемом помещении, имеющим все условия нормальной работы, удовлетворяющем нормам технической и санитарным безопасности. На рис. 4.13 приведен пример рабочего места аэролога СРЗ КТ.

На АЭ, оснащенной СРЗ КТ, должно иметься [152]:

- стандартное наземное метеоборудование (психрометрическая будка), для проведения метеонаблюдений у поверхности земли;
- дизель-генераторы, запас расходных материалов для недельного проведения зондирования и установки для генерации и наполнения оболочек водородом (или гелием);
- средства электросвязи.

При исполнении СРЗ КТ в мобильном варианте оборудование должно быть размещено в кузове автомобиля. Тип автомобиля должен учитывать массогабаритные характеристики АС-2, которая должна размещаться под радиопрозрачным обтекателем на крыше автомобиля.

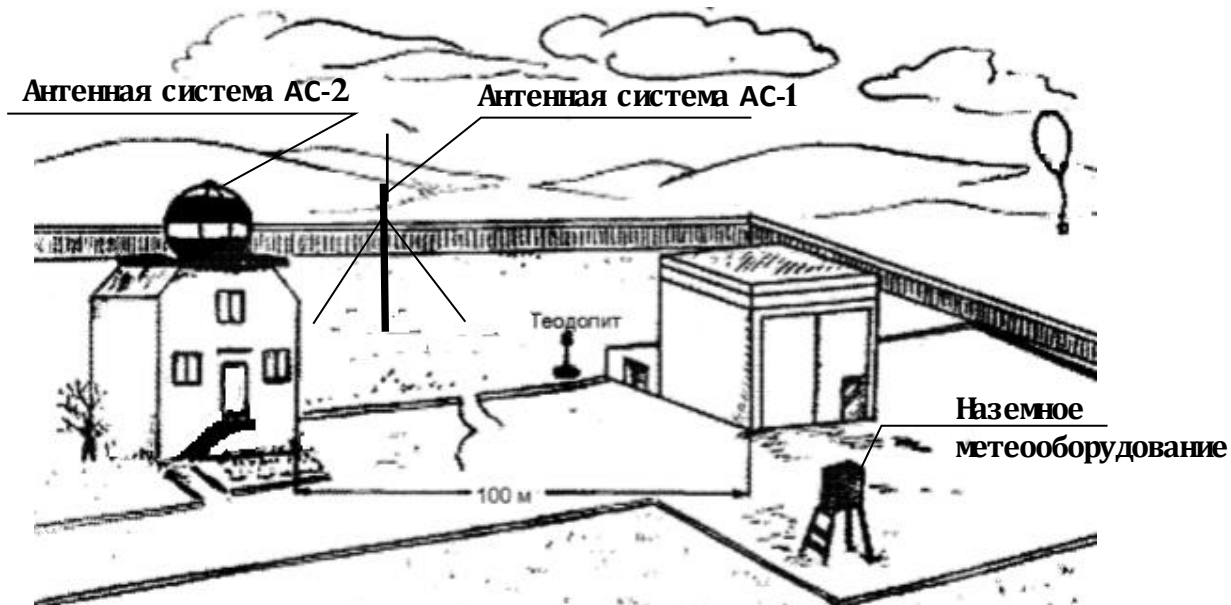


Рисунок 4.12. Размещение антенных систем АС-1 и АС-2 на АЭ

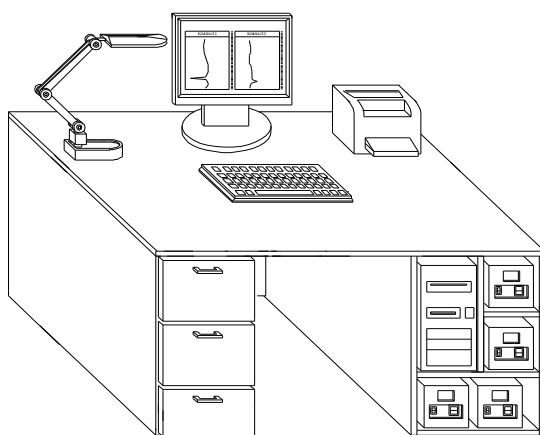


Рисунок 4.13. Рабочее место аэролога СРЗ КТ (стационарный вариант)

Для мобильного варианта СРЗ КТ наиболее подходит автомобиль отечественного производства ГАЗель NEXT.

Вариант рабочего места аэролога представлен на рис. 4.14.

Расчет мобильного варианта СРЗ КТ должен включать не менее 2 человек, в том числе водителя-оператора.



Рисунок 4.14. Рабочее место аэролога СРЗ КТ (мобильный вариант)

Достоинством мобильного варианта СРЗ КТ является то, что система может быть размещена в районе аэродрома и метеоролог-синоптик может использовать данные радиозондирования непосредственно при разработке метеосводок и метеопрогнозов.

Вместе с тем, мобильный вариант СРЗ КТ должен иметь необходимый (недельный) запас водорода (или гелия) и комплект РЗ. Следовательно, для обеспечения бесперебойной работы СРЗ КТ в мобильном варианте должен быть предусмотрен прицеп, укомплектованный баллонами с водородом (или гелием) и комплектом РЗ.

Все работы на СРЗ КТ должны выполняться квалифицированными специалистами, имеющими требуемые навыки.

В целях поддержания оборудования СРЗ КТ на нем должны выполняться требуемые работы по техническому обслуживанию. Техническое обслуживание необходимо проводить в рамках еженедельного и ежеквартального осмотра и проверки работоспособности системы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В ходе исследований, проведенных в данной главе получены следующие результаты:

1. Разработана методика оценки потенциальных характеристик качества функционирования модуля первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах радиозонда.

2. Разработана методика оценки фактически достижимых характеристик качества функционирования модуля первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах радиозонда.

3. Проведены расчет и оценка потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

4. Проведены расчет и оценка фактически достижимых характеристик помехоустойчивости и точности алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда

5. Выполнена оценка степени критичности синтезированных квазиоптимальных алгоритмов первичной комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений.

6. Сформулированы рекомендации по размещению и применению комплексной системы радиозондирования атмосферы.

На основании полученных результатов сделаны следующие **выводы**:

1. Анализ потенциальных характеристики точности и помехоустойчивости СРЗ КТ позволяет утверждать, что в условиях нормальной помеховой обстановки для СРНС и АРЛС выигрыша от комплексирования по точности определения высоты и скорости подъема радиозонда, как и следовало ожидать, практически нет. В установившемся режиме для максимальной конфигураций МКПОИ ПК (ГЛОНАСС+GPS+АРЛС) СКО ошибок оценивания высоты составляет около 2 м, а скорости подъема – около 0,19 м/с.

В условиях сложной помеховой обстановки выигрыш от комплексирования становится явным. Установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ увеличивается примерно в 2,5 раза и составляет 2,5 м, а при $q_c = 10^{-5}$ – увеличивается примерно в 3 раза и составляет около 3 м. При этом АРЛС работает в штатном режиме ($q_{пл} = 10$). В не комплексном варианте работы системы, т.е. при отсутствии сигналов СРНС, установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ составляет 20 м, а для $q_c = 10^{-5}$ – 35 м.

В не комплексном режиме использования АРЛС установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда составляет для $q_{пл} = 1$ 70 м и более 120 м при $q_{пл} = 0,1$. Выигрыш от комплексирования в этом случае еще более очевиден. СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда (при $q_c = 10^{-3}$) для комплексного использования АРЛС в более чем 20 раз меньше, чем для не комплексного в условиях работы АРЛС в сложной помеховой обстановке.

3. Полученные фактически достижимые характеристики точности и помехоустойчивости СРЗ КТ подтверждает вывод о преимуществе комплексной обработки информации в условиях сложной и ухудшенной помеховой обстановки в районе проведения радиозондирования.

Для условий работы в штатной помеховой обстановке значения СКО ошибок оценивания высоты для комплексного и не комплексного варианта использования СРНС практически совпадают. Расчеты показали, что для значений отношения сигнал/шум менее $q_c = 10^{-5}$ в не комплексном варианте использования МПКОИ ПК фактически наступает срыв слежения за радиозондом, чего не происходит при комплексной обработке радиосигналов АРЛС И СРНС (о чем свидетельствуют значения СКО ошибки оценивания высоты). В тех же условиях при использовании комплексных алгоритмов наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК (СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается примерно до 20 м).

Итак, существенный выигрыш от применения комплексных алгоритмов наблюдается, как и следовало ожидать, при уменьшении значений отношения сигнал/шум $q_{рл}$. В не комплексном варианте уменьшение отношения $q_{рл}$ приводит к значительному росту СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда вплоть до срыва слежения за радиозондом. При использовании комплексных алгоритмов, при штатной помеховой обстановке для СРНС, наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК, при этом СКО ошибки оценивания высоты увеличивается до 20 м.

4. Проведенная оценка степени критичности синтезированных алгоритмов первичной комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений позволяет утверждать следующее:

- МПКОИ ПК практически не критична к изменению параметров модели задающего генератора передатчика радиозонда.

- изменение масштаба турбулентности в пределах от 100 м до 1000 м приводит к незначительному диапазону отклонений СКО ошибки оценивания высоты. Так при масштабе турбулентности 100 м отклонение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда составляет 2,5%, а при масштабе турбулентности 1000 м – 3,2%.

Таким образом, анализ степени критичности МПКОИ ПК к изменению параметров моделей полезных сигналов и моделей динамики изменения компонент вектора состояния показал, что отклонения параметров этих моделей от расчетных значений не приводят к существенному ухудшению качества оценивания компонент вектора состояния. Это подтверждает достоинства комплексной обработки информации и возможность практической реализации СРЗ КТ.

5. Отмеченные достоинства систем СРЗ КТ позволяют обеспечить достоверность информации о состоянии атмосферы на маршрутах и в районах полетов ВС и, тем самым, рост уровня безопасности и регулярности полетов ВС.

6. В заключение следует сказать еще об одном важном обстоятельстве.

Дело в том, что в настоящее время синоптик на АМСГ разрабатывает авиационные прогнозы, опираясь на наземную метеоинформацию со своего и других, как правило близлежащих, аэродромов, а также на консультации Региональных центров долгосрочных прогнозов, базирующихся, в свою очередь, на данных сетевого радиозондирования, осуществляемого 2 раза в сутки. Разрабатывая прогнозы метеоусловий для полётов по трассам и, в особенности, для взлёта и посадки, синоптику приходится полагаться, в основном, только на собственную интуицию, наработанный синоптический опыт, знание местных условий и далеко не полные бортовые наблюдения. Оправдываемость таких прогнозов в принципе не может быть высокой, что вынуждены признавать ведущие специалисты в области метеобеспечения и эксплуатации воздушного транспорта.

Для повышения достоверности прогнозов на взлёт и посадку предлагается использовать то, что заведомо не является фантазией - специализированный лёгкий беспилотный летательный аппарат, оснащенный необходимыми средствами измерений, с возможностью подъёма на уровень круга (возможно и выше) по команде синоптика или диспетчера, а также средствами связи для оперативной передачи информации синоптику (диспетчеру, на борт ВС). Возможно, что со временем такой аппарат, базируясь на существующей метеоплощадке, просто заменит ее со всеми вытекающими из этого удобствами в сертификации, обслуживании, проверке, ремонте средств измерений и открывающихся при этом совершенно новых возможностях повышения достоверности определения состояния атмосферы в районе ВПП и оправдываемости авиационных прогнозов погоды.

7. Система радиозондирования комплексного типа может быть выполнена в стационарном и мобильном варианте.

Размещение стационарного варианта СРЗ КТ должно учитывать естественный рельеф, здания и другие конструкции, мешающие проведению радиозондирования. Основная особенность стационарного варианта СРЗ КТ состоит в наличии двух антенных систем: антенны для приема ретранслированных радиосигналов СРНС (АС-1) и антенны запроса и приема ответных радиосигналов РЗ (АС-2). Это накладывает ограничения на размещения СРЗ КТ.

Мобильный вариант СРЗ КТ должен предусматривать необходимый (недельный) запас водорода (или гелия) и комплект РЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации **научно-технической задачи** повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы, предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

Решение научно-технической задачи опиралось на проведенный автором и представленный в работе проблемный анализ состояния метеорологического обеспечения полетов и состояния аэрологической сети Росгидромета, позволивший выявить следующие противоречия:

- **противоречие практического характера** между требованиями к качеству аэронавигационного и метеорологического обеспечения, проявляющееся в необходимости обеспечения экипажей ВС, диспетчеров УВД и авиационного персонала, проводящего подготовку ВС к полету, необходимой метеоинформацией на всех этапах полета ВС и достоверностью метеорологической информации, предоставляемой авиационными метеослужбами;

- **противоречие научного характера** между необходимостью повышения достоверности данных радиозондирования путем комплексной обработки метеоинформации на уровне обработки радиосигналов и отсутствием алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

В результате решения научно-технической задачи были получены следующие основные результаты и выводы:

1. Проведен анализ существующих и перспективных методов радиозондирования атмосферы, на основании которого установлена степень влияния данных радиозондирования на безопасность и регулярность полетов воздушных судов.

Радиозондирование атмосферы, обладая максимальной всепогодностью, высокой разрешающей способностью и информативностью, не всегда обладает требуемой достоверностью получаемых метеоданных о состоянии тропосферы и нижней стратосферы, а в ряде случаев отдельные данные радиозондирования могут быть не приемлемы для разработки качественных и достоверных метеопрогнозов.

Причина кроется в том, что современные системы радиозондирования (МАРЛ-А(Т) и ВЕКТОР-М и др.), эксплуатируемые на аэрологической сети Росгидромета, обладают рядом недостатков, основными из которых являются: потеря данных радиозондирования из-за срывов слежения за радиозондом и низкая помехоустойчивость. Системы радиозондирования спутникового типа пока не являются массовым и не могут коренным образом изменить в положительном направлении ситуацию в аэрологическом зондировании атмосферы. Кроме этого, спутниковые системы также обладают достаточно низкой помехоустойчивостью.

Коренным образом улучшить качество функционирования систем радиозондирования можно выполнив их интеграцию на базе современных теорий комплексирования информации.

2. Теоретически разработана и обоснована структура перспективной комплексной системы радиозондирования атмосферы. Ее отличительными особенностями являются:

- установка на борт радиозонда ретранслятора навигационных сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, в целях их последующей обработки в навигационном вычислителе комплексной базовой станции слежения. Таким образом, решение навигационной задачи переносится с борта радиозонда в вычислитель комплексной базовой станции слежения;

- построенные на основе марковской теории комплексирования информации алгоритмы комплексной первичной обработки сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, ретранслированных радиозондом совместно с данными о пространственных координатах радиозонда, полученными аэрологической радиолокационной станцией.

Задача синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS решалась в интересах:

- уменьшения вероятности срыва при слежении за радиозондом в атмосфере;
- обеспечения помехоустойчивости системы радиозондирования при ее работе в условиях сложной помеховой обстановки и при малых отношениях сигнал/шум на входах приемных устройств базовой станции слежения;
- обеспечения требуемой точности определения пространственных координат радиозонда.

Все сказанное позволяет повысить достоверность данных радиозондирования в интересах метеобеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

3. Методом имитационного моделирования в соответствии с разработанной методикой проведен расчет потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости комплексной системы радиозондирования.

Результаты расчетов позволяют утверждать, что в условиях нормальной помеховой обстановки для СРНС и АРЛС выигрыша от комплексирования по точности определения высоты и скорости подъема радиозонда практически нет. В условиях сложной помеховой обстановки выигрыш от комплексирования становится явным. Установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ увеличивается примерно в 2,5 раза и составляет 2,5 м, а при $q_c = 10^{-5}$ – увеличивается примерно в 3 раза и составляет около 3 м. При этом АРЛС работает в штатном режиме ($q_{рл} = 10$). В не комплексном варианте работы системы, т.е. при отсутствии сигналов СРНС, установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ составляет 20 м, а для $q_c = 10^{-5}$ – 35 м. В не комплексном режиме использования АРЛС установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда составляет 70 м (для $q_{рл}=1$) и около 20 м ($q_{рл} = 10$).

4. Результаты расчета фактически достижимых характеристик точности и помехоустойчивости системы радиозондирования подтверждают вывод о преимуществе комплексной обработки информации в условиях сложной и ухудшенной помеховой обстановки в районе проведения радиозондирования.

Расчеты показали, что для значений отношения сигнал/шум менее $q_c = 10^{-5}$ в некомплексном варианте системы фактически наступает срыв слежения за радиозондом, чего не происходит при комплексной обработке радиосигналов АРЛС и СРНС. При использовании комплексных алгоритмов наблюдается лишь ухудшение качества функционирования системы радиозондирования (СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается примерно до 20 м).

5. Оценка степени критичности синтезированных алгоритмов первичной комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений позволяет утверждать, что отклонения параметров этих моделей от расчетных значений не приводят к существенному ухудшению качества данных радиозондирования. Это еще раз подтверждает достоинства комплексной обработки информации и возможность практической реализации комплексных систем радиозондирования атмосферы.

6. Выявленные в ходе исследований достоинства комплексной системы радиозондирования позволяют обеспечить достоверность предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации и, тем самым, повысить качество метеобеспечения полетов.

Результаты работы также позволяют:

- использовать комплексную систему радиозондирования атмосферы для модернизации аэрологической сети Росгидромета;
- использовать данные комплексной системы радиозондирования как эталонные при валидации данных других измерителей метеопараметров атмосферы, прежде всего, радиолокационных метеорологических комплексов, микроволновых профиломеров, лазерных метеорологических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные происшествия и инциденты. //официальный сайт ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»//http://www.aviamettelecom.ru/?id_top=34.
2. **Азаров М.А.** Обработка сигналов телеметрии и дальности аэрологического зонда. // Цифровая обработка сигналов, №2, 2004. С34-39
3. **Азаров М.А.** Общее описание алгоритмов АП «ЭОЛ». – М.: ЦАО, 2000. – 15с.
4. Анализ координатно-телеметрических данных современных систем радиозондирования: методическое пособие / А. П. Кац; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ГУ "Центральная аэрологическая обсерватория". - Долгопрудный: ЦАО, 2010. – 58 с.
5. Анализ состояния метеообеспечения гражданской авиации // Официальный сайт ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» //http://www.aviamettelecom.ru/?id_top=30.
6. Анализ анкетирования пользователей авиаметеорологической информации на предмет качества обслуживания. //Официальный сайт ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета» //<http://www.gamc.ru/>
7. Анализ проведения оценки компетентности авиационного метеорологического персонала в учреждениях Росгидромета в 2015 году. // Официальный сайт ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» //http://www.aviamettelecom.ru/?id_top=30.
8. Анализ безопасности полетов при аэронавигационном обеспечении в ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» в 2018 г. // <https://gkovd.ru>.
9. **Аронин Г.С.** Практическая аэродинамика. – Воениздат, 1962. – 384 с.
10. **Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М.,** Авиационная метеорология. – М.: Транспорт, 1985. – 62 с.
11. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). / Под ред. Ю.С. Седунова, С.И. Авдюшина, Е.П. Борисенкова, О.А. Волковицкого, Н.Н. Петрова,

Р.Г. Рейтенбаха, В.И. Смирнова, А.А. Черникова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.

12. Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс «ВЕКТОР-М». Руководство по эксплуатации. // <http://www.vektor.ru/files/doc/Vector-ER.pdf>.

13. Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс «ВЕКТОР-М». Руководство оператора. // <http://www.vektor.ru/files/doc/руководство%20оператора.pdf>.

14. **Бакулев П.А.** Радиолокационные системы: учебник для вузов / П.А. Бакулев. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 376 с.

15. **Баранов А.М., Мазурин Н.И., Солонин С.В., Янковский И.А.** Авиационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 281 с.

16. **Баранов А.М.** Облака и безопасность полетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.

17. **Баранов Н.А.** Восстановление пропущенных данных измерений профиля ветра // В мире научных открытий. 2012. № 12.1. С. 32-43.

18. **Баранов Н.А., Турчак Л.И.** Оценка риска обледенения воздушных судов по данным температурного зондирования атмосферы // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам. Москва. Изд-во МАИ. 2017. С. 732-734.

19. Безопасность полетов // Официальный сайт ФАВТ // <https://www.favt.ru/dejatelnost-bezopasnost-poletov/>

20. **Богаткин О.Г.** Авиационные прогнозы погоды. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. - 288 с.

21. **Богаткин О.Г.** Основы авиационной метеорологии. Учебник. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 339 с.

22. **Богаткин О.Г.** Авиационная метеорология для летчиков. – СПб.: ООО КРОМ, 2008. – 240 с.

23. **Богаткин О.Г.** Особенности метеорологического обеспечения полетов на международных трассах. – Л.: ЛГМИ, 1989. – 71 с.

24. **Болелов Э.А.** Радиолокационные системы воздушного транспорта. Учебник. / Э.А. Болелов, А.И. Козлов, Э.А. Лутин, А.В. Прохоров, С.Б. Стукалов, Д.Н. Яманов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2018. - 288 с.
25. **Болелов Э.А.** Радионавигационные системы воздушного транспорта. Учебник. / Э.А. Болелов, О.И. Завалишин, А.И. Козлов, А.Т. Кудинов, В.П. Логачев, С.Б. Стукалов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2018. - 260 с.
26. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Модель ошибок измерения параметров атмосферы в системе радиозондирования, вносимых каналом телеметрии. // Мир измерений, №2, 2020. С.24-27.
27. **Болелов Э.А., Биктеева Е.Б., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Комплексная система аэрологического зондирования атмосферы // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. С.582-583.
28. **Болелов Э.А.** Повышение оправдываемости метеопрогнозов по аэродрому путем комплексирования измерителей метеопараметров атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА. 2019 т. 22, №5. С. 43-53.
29. **Болелов Э.А.** Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения. // Научный вестник МГТУ ГА, том 21, №5, 2018. С.117-129.
30. **Болелов Э.А., Матюхин К.Н., Симонов Д.В.** Предложения по разработке перспективного метеозонда для формирования краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2018. С.160-161.
31. **Болелов Э.А.** Оправдываемость метеопрогнозов для аэродромов: состояние проблемы и пути ее решения // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». – М.: ИД Академия имени

Н.Е. Жуковского, 2018. С.175-176.

32. **Болелов Э.А., Кораблев Ю.Н., Баранов Н.А., Демин С.С., Ещенко А.А.** Комплексная обработка метеоинформации в аэродромных мобильных комплексах метеолокации и зондирования атмосферы. // Научный вестник ГосНИИ ГА, №20 (331), 2018. С.82-92.

33. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б., Кораблев Ю.Н.** Динамические погрешности датчиков температуры при радиозондировании атмосферы. // Научный вестник МГТУ ГА, том 20, №5, 2017. С.88-97.

34. **Болелов Э.А., Губерман И.Б., Ещенко А.А., Козлов А.И., Петрова М.В., Фридзон М.Б.** Метеорологическое обеспечение гражданской авиации России на этапе гармонизации и интеграции национальных аэронавигационных систем в мировую. // Мир измерений, №4, 2016. С.28-33.

35. **Болелов Э.А.** Определение скорости и направления ветра в комплексных системах аэрологического зондирования атмосферы // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2016. С.128-129.

36. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М.** Система аэрологического радиозондирования атмосферы с использованием ретранслированных сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2016. С.129-130.

37. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М.** Постановка задачи синтеза алгоритма комплексной обработки информации о пространственном положении аэрологического радиозонда. // Научный вестник МГТУ ГА, №226(4), 2016. С.229-239.

38. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М.** Алгоритм комплексной обработки информации о пространственном положении аэрологического радиозонда. // Научный вестник МГТУ ГА, том 19, №5, 2016. С.124-135.

39. **Болелов Э.А.** Математические модели информационных и

сопутствующих процессов применительно к задаче комплексирования методов сопровождения аэрологического радиозонда в атмосфере. // Проблемы безопасности российского общества, №2, 2016. С.101-109.

40. **Болелов Э.А.** Обеспечение метеорологической безопасности полетов воздушных судов за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда. // Проблемы безопасности российского общества, №2, 2016. С.118-126.

41. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете. // Научный вестник МГТУ ГА, №222(12), 2015. С.114-119.

42. **Болелов Э.А., Горбунов Р.А., Ермошенко Ю.М., Подобрянский Д.А.** О поверке СИ, предназначенных для работы в сложных внешних условиях, нормах точности, обязательности методики измерений и возможности её аттестации компетентными органами, аккредитованными Росстандартом. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» М. 2017, с 159-162.

43. **Болелов Э.А.** Методы и алгоритмы комплексной обработки метеоинформации при метеорологическом обеспечении воздушных судов гражданской авиации. Дисс. докт.техн. наук.: 05.22.14 / Болелов Эдуард анатольевич; МГТУ ГА. – М., 2021. – 421 с.

44. **Борисенко М.М.** Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Труды ГГО. 1974. Вып. 320. – 205 с.

45. **Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л.** Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.

46. **Бюшгенс Г.С.** Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1995. – 772 с.

47. **Верещагин А.В.** и др. Методы и алгоритмы обработки сигналов бортовых когерентно-импульсных радиолокационных станций для повышения безопасности полетов самолетов в сложных метеоусловиях / Под ред. Е.А. Сеницына. – С.Пб.: Балт.гос.тех.ун-т, 2012. – 218 с.

48. **Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.К.** Турбулентность в свободной атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 288 с.
49. Воздушный кодекс Российской Федерации.
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/
50. Воздушная навигация: справочник. / А.М. Белкин, Н.Ф. Миронов, Ю.И. Рублев, Ю.Н. Сарайский, – М.: Транспорт, 1988. – 303 с.
51. **Воробьев Л.М.** Воздушная навигация. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
52. Выполнение плана радиозондирования. Программа и качество наблюдений. <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair>.
53. **Гаврилов В.А.** Видимость в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 324 с.
54. **Глазунов В.Г.** Оповещение о сильных сдвигах ветра в районе аэродрома. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 30 с.
55. Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM. Doc 9750 AN/963. ИКАО, 2007.
56. Глобальный аэронавигационный план на 2013-2028 гг. Doc 9750 AN/963. Издание 4-е, ИКАО, 2013.
57. Глобальный план обеспечения безопасности полетов. – Монреаль: ИКАО, 2013 г.
58. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, пер. и доп. /Под ред. А.И.Перова, В.Н.Харисова. - М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
59. **Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М.** Улучшение точностных и динамических характеристик систем синхронизации средств связи и навигации воздушного судна при управлении его движением с АЗН в условиях интенсивных помех, XIII международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» Москва 29-30 апреля 2015г, ч.4, ЕСУ ЕНЖ технические науки, № 4/13, с 15-19.
60. **Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М.** Модели динамики движения ВС и навигационных измерений в аппаратуре потребителей СРНС. Материалы XI

международной научно-практической конференции «Naukowa przestrzen Europy – 2015» 07–15 kwietnia 2015, с 59 – 61.

61. **Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М.** Влияние отражений от подстилающей поверхности на отношение сигнал/помеха в АП СРНС. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития современной науки и образования». 30 апреля 2015 г, Москва (тезисы докладов), ч. 3, с 63-64.

62. **Ермошенко Ю.М.** Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса для комплексного аэрологического радиозондирования атмосферы. // Известия высших учебных заведений. Электроника, том 24, №1, 2019. с.72-78.

63. **Ермошенко Ю.М.** Всегда на высоте. Авиасоюз. № 6 (58) 2015, с 38 – 39.

64. **Ермошенко Ю.М.,** Метрология сетевого радиозондирования атмосферы. Прикладная физика и математика. Наука о земле. Научтехлитиздат, 2015г., с. 50-66.

65. **Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Метрология сетевого радиозондирования атмосферы. Справочник инженера 5/2015, с. 49 – 57.

66. **Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** К методике метрологической аттестации системы сетевого аэрологического радиозондирования атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА, № 222(12), М. 2015г, с 133 – 137.

67. **Ермошенко Ю.М., Евтушенко О.А.** Уменьшение влияния нестабильности опорного генератора в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем на точность навигационных определений путём расширения вектора измерений. НАУ, Ежемесячный научный журнал (ЕНЖ) № 2(7)/2015, ч.3, с 65-68.

68. **Ефимов А.А.** Принцип работы аэрологического информационно-вычислительного комплекса АВК-1. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 149 с.

69. **Жевакин С.А.** Дистанционное зондирование атмосферы в миллиметровом диапазоне радиоволн. // В кн. Труды 1-й Всес. Школы-симпозиума по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере, 1983. С.261-279.

70. **Жулев В.И., Иванов В.С.** Безопасность полетов летательных аппаратов.

– М.: Транспорт, 1986. – 224 с.

71. **Заварина М.В.** Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 164 с.

72. **Зайцева Н.А.** Аэрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 325 с.

73. **Зубков Б.В., Сакач Р.В., Костиков В.А.** Безопасность полетов. Часть 1. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 84 с.

74. **Зубков Б.В., Сакач Р.В., Костиков В.А.** Безопасность полетов. Часть 2. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 76 с.

75. **Зубков Б.В., Сакач Р.В., Костиков В.А.** Безопасность полетов. Часть 3. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 88 с.

76. **Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.** Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. – Екатеринбург: Научное издание НИСО УрО РАН, 2004. – 590 с.

77. **Иванов В.Э., Гусев А.В., Плохих О.В.** Метеорологическая система. Патент РФ 2480791. // <http://www.freepatent.ru/patents/2480791>.

78. **Иванов В.Э., Кудинов С.И., Гусев А.В., Плохих О.В.** Комплексная система радиозондирования атмосферы. Патент РФ 127944. // <https://patentinform.ru/utility-models/reg-127944.html>.

79. Инструкция по оценке оправдываемости прогнозов погоды по маршрутам и районам полетов. Росгидромет, 2009 // http://www.aviamettelecom.ru/index.php?id_top=22.

80. Инструктивный материал по форматам метеорологической информации. Приказ Росгидромета №4 от 16.01.2017.

81. Инструктивный материал по SIGMET и AIRMET. Приказ Росгидромета №95 от 20.02.2015.

82. Инструктивный материал по кодам METAR, SPECI, TAF. Приказ Росгидромета №115 от 05.03.2015.

83. Инструктивный материал по прогнозам погоды в формате GAMET. Приказ Росгидромета №116 от 06.03.2015.

84. Информационно-методическое письмо ЦАО О практике редактирования аэрологических телеграмм, от 19.05.2011 исх. 569/14-04. // <http://caoncr.mipt.ru/monitor/stuff/list.htm>.

85. Исследование возможности использования алгоритмов комплексной обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO в системах радиозондирования атмосферы. Отчет по НИР №АААА-Б18-2180123910041-3/ Руководитель Э.А. Болелов. – М.: МГТУ ГА, 2017.

86. **Кадыгров Е.Н.** Пассивная радиолокация термической структуры атмосферного пограничного слоя. Дисс. докт. техн. наук.: 05.12.14 / Кадыгров Евгений Николаевич; Центральная аэрологическая обсерватория. – М., 2010. – 287 с.

87. **Киселев В.Н., Кузнецов А.Д.** Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. – 429 с.

88. Комплексная обработка метеорологической информации в аэродромных мобильных комплексах метеолокации и зондирования атмосферы в условиях Крайнего Севера и Арктики. Отчет по НИР №АААА-Б19-219060390028-4/ Руководитель Э.А. Болелов. – М.: МГТУ ГА, 2019.

89. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

90. **Котик М.Г.** Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.

91. Комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция «КРАМС-4» // Официальный сайт «Институт радарной метеорологии» <http://iram.ru>.

92. **Кречмер М.В.** Ошибки определения скорости и направления ветра из-за неточного измерения координат. // Труды центральной аэрологической обсерватории, Вып.74, 1966. С.3-22.

93. **Кураков С.А., Куракова П.С., Куракова О.А.** Способ определения усредненного вектора скорости ветра с помощью беспилотного летательного аппарата. Патент РФ 2632270. <https://patentinform.ru/inventions/reg-2632270.html>.

94. **Лапина С.Н.** Классификация метеорологических прогнозов, их

оправдываемость и оценка экономической полезности. – Саратов: Саратовский Государственный университет, 2014. – 9 с.

95. **Мазуров Г.И., Нестерук В.Н.** Метеорологические условия и полеты вертолетов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 254 с.

96. **Малышева Т.А.** Оценка регулярности полетов воздушных судов, выполняемых авиакомпаниями РФ. // Научный вестник МГТУ ГА, №100, 2006. С.178-181.

97. **Малышева Т.А.** Организационно-методическое обеспечение системы поддержки принятия решений в области регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации. Дисс. канд.техн. наук.: 05.02.22 / Малышева Татьяна Алексеевна; МГТУ ГА. – М., 2007. – 200 с.

98. **Матвеев Л.Т.** Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 752 с.

99. Марковская теория оценивания в радиотехнике. / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 503 с.

100. **Маховер З.М., Пеньков А.П.** Методические рекомендации для АМСГ (АМЦ) по выявлению местных климатических особенностей аэродромов. – М.: Гидрометеиздат, 1981. - 28 с.

101. **Метов Х.Т.** Система предупреждения опасного влияния сдвига ветра. Дисс. канд.техн.наук.: 05.13.01 / Метов Хаути Тилович; Академия гражданской авиации. – СПб., 2001. – 158 с.

102. Метеорологическое обеспечение полетов воздушных судов гражданской авиации. – Л.: ОЛАГА, 1980. – 80 с.

103. Метеообеспечение полетов воздушных судов гражданской авиации. Отчет по НИР. – М. ГосНИИ ГА, 2015.

104. Методы и средства инструментальных наблюдений за метеорологическими элементами на авиационных метеорологических станциях. СПб: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», 2011 - 44 с.

105. **Мешков А.В.** Основы авиационной метеорологии. Курс лекций. – М.: АБН аэро, 2012. – 96 с.

106. **Миронов М.А.** Марковская теория оптимального оценивания случайных процессов. – М.: ГосНИИ АС, 2013. - 194 с.
107. **Миронов М.А.** Обнаружение изменения свойств наблюдаемых и ненаблюдаемых случайных процессов // Радиотехника, № 1, 2007. С.39-45.
108. Модель турбулентности атмосферы. Характеристики. ОСТ 1 02514-84.
109. Наставление по применению стандартов образования и подготовки кадров в области метеорологии и гидрологии. Том 1. Метеорология. ВМО-№1083. – 2012.
110. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 4. Аэрологические наблюдения на станциях. Часть 3. Температурно-ветровое зондирование атмосферы. РД 52.11.650-2003. – М.: Росгидромет, 2003.
111. Нормы годности к эксплуатации гражданских аэродромов (НГЭА-92). – Новосибирск, 1992. – 138 с.
112. **Окоренков В.Ю.** Метрологическая надежность метеорологических информационно-измерительных систем. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, №561, 2010. С. 194-212.
113. Отчеты о состоянии безопасности полетов. // официальный сайт МАК// <https://mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov>.
114. **Осипов Ю.Г., Герасимова Н.В., Дядюра А.В.** Устройство и принцип действия аэрологической информационно-измерительной системы «Улыбка». – СПб.: РГГМУ, 2009. – 60 с.
115. **Параев Ю.И.** Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации. – М.: Сов. радио, 1976.
116. **Переведенцев Ю.П., Богаткин О.Г.** Атмосферная турбулентность и ее прогноз. – Казань.: изд. Казанского гос. университета, 1978. – 160 с.
117. **Пудловский В.Б.** Методы и алгоритмы навигационных определений с использованием ретранслированных сигналов спутниковых радионавигационных систем. Дисс. канд. техн. наук.: 05.12.14 / Пудловский Владимир Борисович; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2009. – 266 с.
118. **Пьянков В.С.** Экстремальные особенности метеообеспечения полетов в субарктическом и арктическом регионе России // Авиапанорама, №5, 2016. С.74-76.

119. Радиолокатор аэрологический малогабаритный РАМ-1. Руководство по эксплуатации. – М.: ООО «Аэроприбор», 2011. – 47 с.
120. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Методическое пособие. – М.: Росгидромет, 2009. – 110 с.
121. Рекомендации по эксплуатации автоматизированных метеорологических комплексов в наблюдательных подразделениях. Р 52.04.818–2014. – СПб. ГГО им. Н.Е. Воейкова, 2014. – 46 с.
122. **Решетов В.Д.** Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.
123. **Рудельсон Л.Е.** Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Часть II. Функциональное программное обеспечение. Книга 7. Обработка метеорологической информации. – М.: МГТУ ГА, 2009. – 96 с.
124. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. / Под ред. К.Г. Абромовича, А.А. Васильевой. – М.: Госкомгидромет, 1985. – 305 с.
125. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП), Doc 9859 AN/460, ИКАО, Монреаль, 2006.
126. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО-№8, Женева, 2010.
127. Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации. ВМО-№731, Женева, 2014.
128. Руководство по практике метеорологических подразделений, обслуживающих авиацию. ВМО-№732, 2 изд., Женева, 2003.
129. Руководство по авиационной метеорологии, Doc 8896 AN/893, ИКАО, Монреаль, 2011.
130. Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах, Doc 9837 AN/454, ИКАО, Монреаль, 2006.

131. Руководство по системе управления качеством для предоставления метеорологического обслуживания международной аэронавигации. Принципы и руководящие положения. ВМО №1001, Женева, 2006.
132. Руководство по глобальной системе наблюдений. ВМО №488, Женева, 2010.
133. Руководство по технической эксплуатации базовой станции системы радиозондирования атмосферы ПОЛЕТ, 2019.
134. Руководство по координации между органами обслуживания воздушного движения, службами аэронавигационной информации и авиационными метеорологическими службами. Doc 9377 AN/915. ИКАО, Монреаль, 2014.
135. Руководство по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации СССР (РПП ГА-90). – М.: Воздушный транспорт, 1990.
136. Руководство по техническое эксплуатации комплекса аэрологического зондирования атмосферы навигационного ПОЛЕТ, 2020.
137. Руководство по летной эксплуатации Ил-96-300.
138. **Русин И.Н., Тараканов Г.Г.** Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. – СПб.: РГГМИ, 1996. – 308 с.
139. **Рыбалкина А.Л., Спирин А.С.** Определение уровня безопасности полетов на основе синтеза метеоинформации // Надежность и качество сложных систем, №3(11), 2015. С.39-43.
140. **Рыбалкина А.Л., Трусова Е.И., Шаров В.Д.** Методика оценки риска предстоящего полета для вертолетов с учетом неблагоприятных метеоусловий// Научный вестник МГТУ ГА, том 21, №6, 2018. С.124-140.
141. **Сакач Р.В., Зубков Б.В.** и др. Безопасность полетов. - М.: Транспорт, 1989. – 239 с.
142. **Сапунов М.В., Мельникова И.Н.** и др. Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса, ТОМ 13, №1, 2016. С.149-160.
143. Сводки и прогнозы по аэродрому. Пособие для пользования кодами.

ВМО-№782, Женева, 2008.

144. **Селезнев В.П.** Метеорологическое обеспечение полетов. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 190 с.

145. **Смирнова А.А.** Объективный анализ облачности и опасных явлений погоды по данным радиолокационных и станционных наблюдений // А.А. Смирнова. Пермь: Изд-во Пермь. ун-та. 2005.

146. **Сокол П.П.** Повышение безопасности воздушного движения на основе совершенствования метеорологического обеспечения полетов. Дисс. канд. техн. наук.: 05.22.13 / Сокол Павел Павлович; МГТУ ГА. – М., 2010. – 149 с.

147. **Соловьев Ю.А.** Спутниковая навигация и ее приложения. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 326 с.

148. **Сосулин Ю.Г.** Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Советское радио, 1978.

149. Справочник пилота и штурмана гражданской авиации. / Под ред. И.Ф. Васина. – М.: Транспорт, 1988. – 320 с.

150. Технические характеристики и критерии эффективности функционирования для систем во вспомогательной службе метеорологии в полосах частот 403 МГц и 1680 МГц. Рекомендация МСЭ-RRS.1165-2.

151. **Тихонов В.И., Миронов М.А.** Марковские процессы. – М.: Сов радио, 1977.

152. **Толмачева Н.И.** Комплексное исследование турбулентности, облачности и осадков с использованием радиозондовых, стационарных и радиолокационных измерений. Дисс. канд. географ. наук.: 11.00.09 / Толмачева Наталья Игоревна; Пермский государственный университет. – Пермь, 2000. – 140 с.

153. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена Правительством РФ №1734-р от 22.11.2008.

154. Управление безопасностью полетов. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Монреаль, 2013.

155. Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации», приказ Минтранса РФ №128 от

31.07.2009 г.

156. Федеральные авиационные правила «Предоставления метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» 3.03.2014 г. №60.

157. Федеральные авиационные правила «Использование воздушного пространства Российской Федерации», приказ Минтранса РФ №138 от 11.03.2010 г.

158. Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к вертодромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов», приказ Минтранса РФ №91 от 13.03.2017 г.

159. **Фридзон М.Б.** Метрология радиозондирования атмосферы (Методология и достоверность результатов радиозондирования атмосферы). Изд. LAPLAMBERT Academic Publishing, Berlin, 2011. – 288 с.

160. **Фридзон М.Б.** Методология радиозондирования атмосферы и достоверность измерений вертикальных профилей температуры и влажности до высот 35-40 км. Дисс. докт. техн. наук.: 05.12.04 / Фридзон Марк Борисович; Центральная аэрологическая обсерватория. – М., 2004. – 329 с.

161. **Фридзон М.Б., Терешонок Е.А., Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М.** Натурные сравнительные исследования радиолокационной и радионавигационной систем аэрологического зондирования атмосферы // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. С. 641-642.

162. **Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М.** Создание специализированной автоматической метеорологической наблюдательной сети на базе вышек сотовой связи с целью повышения достоверности и надёжности прогнозов опасных явлений погоды. Метеорология и гидрология, №2, 2009 г, с 91-98.

163. **Черная О.О.** Авиаметеообеспечение и причины авиационных происшествий: итоги анализа окончательных отчетов МАК за 2015 год и январь-сентябрь 2016 года. // Метеоспектр №4, 2016.

164. **Ципенко В.Г.** Основы аэродинамики и летно-технические

характеристики воздушных судов. Часть 1. Основы аэродинамики. / В. Г. Ципенко, М. Г. Ефимова. – М.: МГТУГА, 2009. – 64 с.

165. **Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А.** О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов // Информационный сборник №37. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов - Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2010. -С.142-153.

166. **Шерстюков Б.Г.** Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // "Арктика и Север" - междисциплинарный электронный научный журнал. - Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, №24., 2016 – С. 39-67.

167. **Шмелькин Ю., Волков Н.,** XXI век: Технология МИТРА – ГИС МЕТЕО для авиации. // Новости УВД, №4(84), 2006, С.18-19.

168. **Юркин Ю.А.** Аэродромы, аэропорты и воздушные перевозки. – М.: «Авиа Бизнес Групп», 2009. – 154 с.

169. **Ярлыков М. С.** Статистическая теория радионавигации. - М.: Радио и связь, 1985. – 345 с.

170. **Ярлыков М.С.** Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. – М.: Радиотехника, 2017. – 416 с.

171. **Ярлыков М.С., Миронов М.А.** Марковская теория оценивания случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1993. – 464 с.

172. **Bolelov E.A.** The use of modern IT-technologies in aeronautical and meteorological support of flights of aircrafts of civil aviation. Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference.– М.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017. P. 173-175.

173. **Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Galaeva K.I., Ziabkin S.A.** Analysis of the height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers. Civil Aviation High Technologies. 2020; 23(1):19-27.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АРЛС – аэрологическая радиолокационная станция;
- АЭ – аэрологическая станция;
- АПВ – апостериорная плотность вероятности;
- НКА – навигационный космический аппарат
- АКОИ - алгоритм комплексной обработки информации
- АПКОИ – алгоритм первичной комплексной обработки информации
- АНЗ - аэронавигационный запас топлива
- АП - авиационное происшествие
- АРЛС - аэрологическая радиолокационная станция
- АС – антенная система
- АСПД - автоматизированная система передачи данных
- БГШ - белый гауссовский шум
- БП - безопасность полетов
- БСС - базовая станция слежения
- ВС - воздушное судно
- ВНГО - высота нижней границы облаков
- ВПП - взлетно-посадочная полоса
- ГА - гражданская авиация
- ГЛОНАСС - Российская глобальная спутниковая радионавигационная система
- ГСК - гринвичская прямоугольная система координат
- ДНА - диаграмма направленности антенны
- ДМРЛ - доплеровская метеорологическая радиолокационная станция
- ИКАО - международная организация гражданской авиации
- КБСС – комплексная базовая станция слежения
- КВС - командир воздушного судна
- КЗТ - компенсационная заправка топливом

КОИ – комплексная обработка информации;

КСРЗ - комплексная система радиозондирования

ЛГО - латексная газонаполненная оболочка

МАК - межгосударственный авиационный комитет

МО - метеорологическое обеспечение полетов

МРЛС - метеорологическая радиолокационная станция

МСА - международная стандартная атмосфера

МТОСП - марковская теория оценивания случайных процессов

НКА - навигационный космический аппарат

ОМЯ - опасные для авиации метеорологические явления

ОрВД - Организация воздушного движения

ОЗАТ - основной запас авиационного топлива

ПСП – псевдослучайная последовательность;

ПК – пространственные координаты;

ПЗАТ - потребный запас авиационного топлива

РЛС - радиолокационная станция

РЗ - радиозонд

РК - радиоканал

РЛ - радиолокация

РЛЭ - руководство по летной эксплуатации

РНП - радионавигационный параметр

РП - регулярность полетов

СРЗ – система радиозондирования атмосферы;

СРНС – спутниковая навигационная система;

УВД - управление воздушным движением

ФАП - федеральные авиационные правила

ЦАО - Центральная аэрологическая обсерватория

ШПАР – широкополосный ретранслятор;

АТIS - служба автоматической передачи информации в районе аэродрома
(Automatic terminal information service)

GAMET - зональный прогноз, составляемый текстом с сокращениями для полетов на малых высотах применительно к району полетной информации или его субрайону (General Aviation METeorological forecast)

GPS - американская глобальная спутниковая радионавигационная система

Galileo - европейская глобальная спутниковая радионавигационная система

METAR - метеорологическая сводка по аэродрому (METeorological Aerodrome Report)

SIGMET - метеорологическая информация о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений погоды по маршруту полета, которые могут повлиять на безопасность полетов воздушных судов (SIGnificant METeorological information)

SPECI - специальная метеорологическая сводка (по аэродрому) (SPECIal report)

TAF - прогноз по аэродрому (Terminal Aerodrome Forecast)

TREND - прогноз для посадки

VOLMET - метеорологическая информация для воздушных судов, находящихся в полете (Volume of meteorological information for aircraft in flight).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Методика оценки риска предстоящего полета

Факторы риска предстоящего полета, в соответствии с FRAT, делятся на три категории (табл.А.1).

Таблица А.1 Категории факторов риска FRAT

Категория 1	Квалификация членов летного экипажа ВС (налет, рабочее время и время отдыха экипажа)
Категория 2	Условия эксплуатации ВС (аэродром, время суток, метеоусловия)
Категория 3	Оборудование ВС (особые ограничения по РЛЭ, наличие отказов, полет по специальному разрешению)

Каждая из трех категорий содержит перечень факторов опасности (см. табл. А.2). Каждый фактор опасности оценивается в баллах. Для оценки уровня риска предстоящего полета суммируются баллы факторов опасности, которые характерны для предстоящего полета. Полученная сумма баллов и будет значением риска предстоящего полета:

$$R_{пол} = R_{кэ} + R_{уэ} + R_{об}, \quad (A.1)$$

где: $R_{кэ}$ – суммарный риск категории «Квалификация членов летного экипажа»; $R_{уэ}$ - суммарный риск категории «Условия эксплуатации ВС»; $R_{об}$ - суммарный риск категории «оборудование ВС».

Полученное значение риска $R_{пол}$ сравнивается со специальной шкалой (см. табл. А.3), которая определяет:

- полет безопасный;
- решение о вылете принимает командир воздушного судна (КВС);
- необходимы действия по снижению уровня риска.

В этом состоит суть методики FRAT.

Таблица А.2. Факторы опасности

№	Фактор опасности	Показатель уровня риска	Фактический уровень риска
Категория 1. Квалификация экипажа			
1	Налет КВС менее 200 часов на данном типе ВС	5	
2	Налет 2-го пилота менее 200 часов на данном типе ВС	5	
3	Полет с одним пилотом	5	
4	Налет КВС менее 50 часов за последние 90 дней	3	
5	Налет 2-го пилота менее 50 часов за последние 90 дней	3	
6	Рабочее время более 12 часов	4	
7	Летное время более 8 часов	4	
8	Время отдыха экипажа вне базы менее 12 часов до начала рабочего времени	5	
<i>Суммарный показатель риска по категории 1</i>			
Категория 2. Условия эксплуатации			
9	Заход на посадку по VOR/GPS/LOC/ADF без наведения по высоте	3	
10	Заход на посадку по схеме <i>circle to land</i>	4	
11	Заход на посадку по неопубликованным схемам	4	
12	Горный аэродром	5	
13	УВД на а/д вылета или назначения не осуществляется	3	
14	Неконтролируемый аэродром	5	
15	Не выбран запасной аэродром	4	
16	Превышение основного аэродрома более 5000 футов над уровнем моря	3	
17	ВПП мокрая	3	
18	ВПП загрязнена	3	
19	Полет в зимнее время года	3	
20	Полет в сумерках	2	
21	Полет ночью	5	
22	Длина пробега более 80 % располагаемой длины ВПП	5	
23	Перелет без пассажиров и груза	5	
24	Срочный вылет (экипаж оповещен менее чем за 4 ч до вылета)	3	
25	Международный полет	2	

№	Фактор опасности	Показатель уровня риска	Фактический уровень риска
26	Нет метеоинформации по а/д назначения или по маршруту полета	5	
27	Гроза на а/д вылета или назначения	4	
28	Сильная турбулентность	5	
29	Высота НГО/видимость на а/д назначения менее 200 м/2000 м	3	
30	Сильный ливневой дождь на а/д вылета и/или назначения	5	
31	Переохлажденные осадки на а/д вылета и/или назначения	3	
32	Обледенение (умеренное-сильное)	5	
33	Приземный ветер более 30 узлов (15 м/с)	3	
34	Боковой ветер более 15 узлов (7 м/с)	4	
35	Коэффициент сцепления на ВПП менее 0,4	5	
36	Образование тумана на маршруте полета	3	
37	Сильный снегопад и метели на а/д вылета и/или назначения	3	
38	В течение года имел место хотя бы один случай неоправдавшегося прогноза погоды	3	
39	В течение года имел место хотя бы один случай несвоевременного информирования об изменениях погоды по данному маршруту	3	
40	В течение года имел место хотя бы один случай непринятия пилотом решения об уходе на второй круг/на запасной аэродром при метеоусловиях ниже минимума для посадки	4	
41	Условия, способствующие образованию снежного вихря	4	
42	Отсутствие у пилота опыта пилотирования ВС по приборам	3	
43	Отсутствие у пилота опыта взлета при метеоминимуме	3	
44	В течение года имел место хотя бы один случай вылета при минимуме менее посадочного и отсутствии пригодного аэродрома в часе полета на одном двигателе	3	
45	Отсутствие у пилота опыта взлетов/посадок с предельной составляющей бокового ветра	3	
<i>Суммарный показатель риска по категории 2</i>			
Категория 3. Оборудование ВС			
46	Полет по специальному разрешению (без коммерческой загрузки)	3	
47	Наличие отказов по MEL, влияющих на безопасность полета	2	
48	Особые полетные ограничения по РЛЭ	2	
<i>Суммарный показатель риска по категории 3</i>			
Итого			

При соответствии уровня риска зеленому индикатору полет является безопасным, желтый индикатор свидетельствует о необходимости повышенного внимания к определенным факторам опасности, красный индикатор требует мероприятий по снижению общего риска предстоящего полета.

Таблица А.3. «Светофорная» шкала риска

Уровень риска	Цветовой индикатор
0-23	Зеленый
24-29	Желтый
30 и более	Красный

Методика FRAT далека от совершенства и не учитывает многие факторы полета, однако она может быть усовершенствована путем включения новых факторов опасности. В частности, в [140] методика FRAT была доработана с учетом использования ее для оценки уровня риска предстоящего полета вертолетов и определены граничные значения шкалы оценки риска.

**Расчеты метеоролога аэродромной метеослужбы с использованием
данных радиозондирования
(на примере авиарейса Пулково - Ларнака)**

Практическая работа метеоролога по подготовке метеобеспечения рейса

1. Анализ отклонений параметров атмосферы от стандартных по данным радиозондирования (код КН-04).

Метеоролог раскодирует данные в коде КН-04 для пунктов радиозондирования взлета, посадки, и по пунктам, расположенным по маршруту полета, и определяет отклонения температуры воздуха и высоты стандартных изобарических поверхностей от значений стандартной атмосферы (СА). Расположение пунктов радиозондирования для рассматриваемого рейса приведено на рис.Б.1.

Ниже для примера приводятся данные радиозондирования в коде КН-04 пункта зондирования ИРАКЛИОН.

ИРАКЛИОН

ТТАА 15001 16754 99009 11833 19003 00111 14056 19503 92764 09031 29504 85460 03821
28010 70014 03565 26515 50560 20186 28026 40720 34363 27029 30915 50157 27033 25031
58756 26041 20173 55977 26037 15358 53381 26532 10615 60979 25533 88240 60357 26538
77249 26041 40609 31313 41408 82335=

ТТВВ 15008 16754 00009 11833 11000 14256 22848 03621 33776 01317 44757 01357 55750
01159 66728 01567 77686 04567 88664 04189 99569 14376 11551 15185 22544 14589 33415
32172 44396 34967 55380 37349 66376 37758 77347 42539 88339 43558 99326 46130 11324
46333 22321 46557 33310 48358 44292 51160 55268 55749 66243 59756 77240 60357 88236
57567 99226 54374 11214 56574 22169 51182 33156 53581 44131 52783 55103 61379 66100
60979 21212 00009 19003 11903 27505 22832 29011 33742 28513 44697 26515 55645 28519
66546 28027 77467 27028 88373 27533 99249 26041 11221 27531 22200 26037 33186 25033
44172 27532 55163 27030 66138 26038 77107 25027 88104 24528 99100 25533 31313 41408
82335 41414 11500=

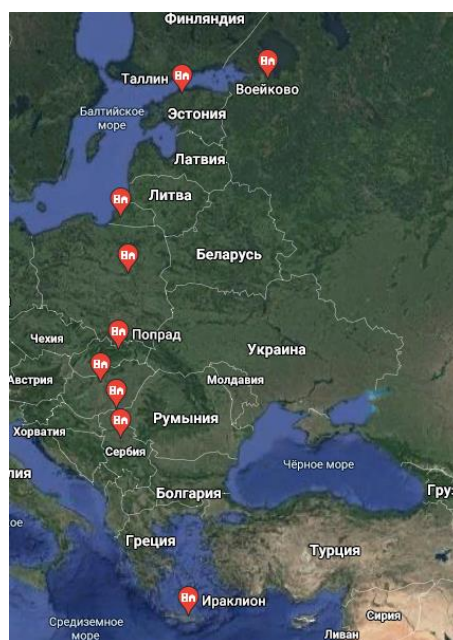


Рисунок Б.1 – Расположение пунктов радиозондирования по маршруту полета (Воейково – Таллин – Калининград – Легионово – Поград – Будапешт – Сегед – Белград – Ираклион)

Результаты расчетов отклонений параметров атмосферы от стандартных по пунктам радиозондирования приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Анализ отклонений параметров атмосферы от СА
Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Санкт-Петербурга

р, гПа	Н _ф , м	Т _ф , °С	Н _{СА} , м	Т _{СА} , °С	ΔН, м	ΔТ, °С
998	?	-6,7				
1000			~100*	14,35		
925	670	-11,7	~600	11,1	70	-22,8
850	1313	-16,1	~1500	5,25	-187	-21,35
700	2768	-21,1	~3000	-4,5	-232	-16,6
500	5200	-32,1	~5500	-20,75	-300	-11,35
400	6730	-43,3	~7000	-30,5	-270	-12,8
300	8630	-51,1	~9000	-43,5	-370	-7,6
250	9810	-53,5	~10500	-53,25	-690	-0,25
200	11240	-55,9	~12000	-56,5	-760	0,6
150	13070	-55,3	~13500	-56,5	-430	1,2
100	15640	-56,7	~16000	-56,5	-360	-0,2

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Галлина

р, гПа	Н _ф , м	T ₊ , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔН, м	ΔТ, °C
1009	?	-4,7				
1000	105	-5,5	~100	14,35	5	-19,85
925	710	-11,5	~600	11,1	110	-22,6
850	1354	-13,3	~1500	5,25	-146	-18,55
700	2810	-20,9	~3000	-4,5	-190	-16,4
500	5230	-33,5	~5500	-20,75	-370	-12,75
400	6760	-45,1	~7000	-30,5	-240	-14,6
300	8640	-51,9	~9000	-43,5	-360	-8,4
250	9810	-54,7	~10500	-53,25	-690	-1,45
200	11250	-53,9	~12000	-56,5	-750	2,6
150	13090	-54,9	~13500	-56,5	-410	1,6
100	15670	-55,7	~16000	-56,5	-330	0,8

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для

Калининграда

р, гПа	Н _ф , м	T ₊ , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔН, м	ΔТ, °C
1011	?	-0,7				
1000	108	-1,3	~100	14,35	8	-15,65
925	723	-6,7	~600	11,1	123	-17,8
850	1383	-5,9	~1500	5,25	-117	-11,15
700	2890	-8,7	~3000	-4,5	-110	-4,2
500	5420	-25,9	~5500	-20,75	-80	-5,15
400	6990	-38,5	~7000	-30,5	-10	-8,0
300	8900	-54,1	~9000	-43,5	-100	-10,6
250	10040	-62,3	~10500	-53,25	-460	-9,05
200	11420	-59,5	~12000	-56,5	-580	-3,0
150	13230	-55,9	~13500	-56,5	-270	0,4
100	15800	-56,7	~16000	-56,5	-200	-0,2

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Легионово

р, гПа	Н _ф , м	T ₊ , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔН, м	ΔТ, °C
999	?	1,6				
1000			~100	14,35		
925	714	-2,3	~600	11,1	114	-13,4
850	1385	-4,3	~1500	5,25	-115	-9,55
700	2903	-10,7	~3000	-4,5	-97	-6,2
500	5410	-27,1	~5500	-20,75	-90	-6,35
400	6980	-39,7	~7000	-30,5	-20	-9,2
300	8880	-54,3	~9000	-43,5	-120	-10,8
250	10030	-60,5	~10500	-53,25	-470	-7,25
200	11420	-56,5	~12000	-56,5	-580	0
150	13260	-54,1	~13500	-56,5	-240	2,4
100	15840	-56,5	~16000	-56,5	-160	0

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Попрада

р, гПа	Н _ф , м	T ₊ , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔН, м	ΔТ, °C
928	?	1,4				
1000			~100	14,35		
925	721	1,4	~600	11,1	121	-9,7
850	1397	-2,7	~1500	5,25	-103	-7,95
700	2916	-11,1	~3000	-4,5	-84	-6,6
500	5410	-29,5	~5500	-20,75	-90	-8,75
400	6960	-43,1	~7000	-30,5	-40	-12,6
300	8840	-52,7	~9000	-43,5	-160	-9,2
250	10010	-53,1	~10500	-53,25	-490	0,15
200	11440	-53,5	~12000	-56,5	-560	3,0
150	13290	-53,9	~13500	-56,5	-210	2,6
100	15890	-55,3	~16000	-56,5	-110	1,2

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Будапешта

р, гПа	H _ф , м	T _ф , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔH, м	ΔT, °C
993	?	4,4				
1000			~100	14,35		
925	719	4,8	~600	11,1	119	-6,3
850	1402	-0,3	~1500	5,25	-98	-5,55
700	2925	-9,7	~3000	-4,5	-75	-5,2
500	5430	-29,1	~5500	-20,75	-70	-8,35
400	6980	-42,5	~7000	-30,5	-20	-12,0
300	8860	-53,3	~9000	-43,5	-140	-9,8
250	10030	-52,9	~10500	-53,25	-470	0,35
200	11470	-51,3	~12000	-56,5	-530	5,2
150	13320	-54,7	~13500	-56,5	-180	1,8
100	15920	-55,3	~16000	-56,5	-80	1,2

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Сегеда

р, гПа	H _ф , м	T _ф , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔH, м	ΔT, °C
1001	?	3,6				
1000	92	4,2	~100	14,35	-8	-10,15
925	730	4,0	~600	11,1	130	-7,1
850	1413	0,2	~1500	5,25	-87	-5,05
700	2942	-9,5	~3000	-4,5	-58	-5,0
500	5450	-28,5	~5500	-20,75	-50	-7,75
400	7000	-42,7	~7000	-30,5	0	-12,2
300	8880	-54,9	~9000	-43,5	-120	-11,4
250	10040	-54,7	~10500	-53,25	-460	-1,45
200	11480	-51,1	~12000	-56,5	-520	5,4
150	13340	-53,9	~13500	-56,5	-160	2,6
100	15930	-54,9	~16000	-56,5	-70	1,6

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для Белграда

р, гПа	H _ф , м	T _ф , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔH, м	ΔT, °C
987	?	7,6				
1000			~100	14,35		
925	734	5,0	~600	11,1	134	-6,1
850	1420	0,4	~1500	5,25	-80	-4,85
700	2950	-8,7	~3000	-4,5	-50	-4,2
500	5470	-27,9	~5500	-20,75	-30	-7,15
400	7020	-41,7	~7000	-30,5	20	-11,2
300	8900	-55,7	~9000	-43,5	-100	-12,2
250	10070	-53,3	~10500	-53,25	-430	-0,05
200	11510	-50,5	~12000	-56,5	-490	6,0
150	13370	-53,1	~13500	-56,5	-130	3,4
100	15970	-54,3	~16000	-56,5	-30	2,2

Анализ отклонения параметров атмосферы от стандартных для

Ираклиона

р, гПа	H _ф , м	T _ф , °C	H _{СА} , м	T _{СА} , °C	ΔH, м	ΔT, °C
1009	?	11,8				
1000	111	14,0	~100	14,35	11	-0,35
925	764	9,0	~600	11,1	164	-2,1
850	1460	3,8	~1500	5,25	-40	-1,45
700	3014	-3,5	~3000	-4,5	14	1,0
500	5600	-20,1	~5500	-20,75	100	0,65
400	7200	-34,3	~7000	-30,5	200	-3,8
300	9150	-50,1	~9000	-43,5	150	-6,6
250	10310	-58,7	~10500	-53,25	-190	-5,45
200	11730	-55,9	~12000	-56,5	-270	0,6
150	13580	-53,3	~13500	-56,5	80	3,2
100	16150	-60,9	~16000	-56,5	150	-4,4

Для анализа метеопараметров атмосферы и прогноза ОМЯ метеорологом могут быть использованы аэрологические диаграммы пунктов радиозондирования. На рис. Б.2 приведена аэрологическая диаграмма пункта радиозондирования ИРАКЛИОН.

Аэрологическая диаграмма оказывает большую помощь метеорологам аэродромных метеослужб при анализе синоптических процессов и прогнозе отдельных метеовеличин и явлений погоды. Аэрологическая диаграмма дает наглядное представление о распределении по вертикали температуры воздуха, влажности и ветра. С помощью ее метеоролог с достаточной степенью достоверности может определить термодинамические характеристики воздушной массы, параметры облачности, положение фронтального раздела над пунктом зондирования и др. Аэрологическая диаграмма позволяет также прогнозировать возможность возникновения конвективных явлений, обледенения ВС, максимальную температуру воздуха и другие характеристики.

Построения на аэрологической диаграмме и расчеты с ее помощью как правило не занимают много времени, поэтому они достаточно широко используются на практике.

2. Диагноз и прогноз с использованием карт барической топографии

Диагноз и прогноз струйных течений. Для авиации струйные течения имеют большое значение. При полете ВС в зоне струйного течения путевая скорость значительно отличается от воздушной, что обусловлено большой скоростью ветра, нередко достигающей на оси струи значений 200 км/ч и более. ВС, пересекая область струйного течения, испытывает значительный снос. Часто в зоне струйных течений отмечается интенсивная атмосферная турбулентность, которая может значительно осложнить полет ВС.

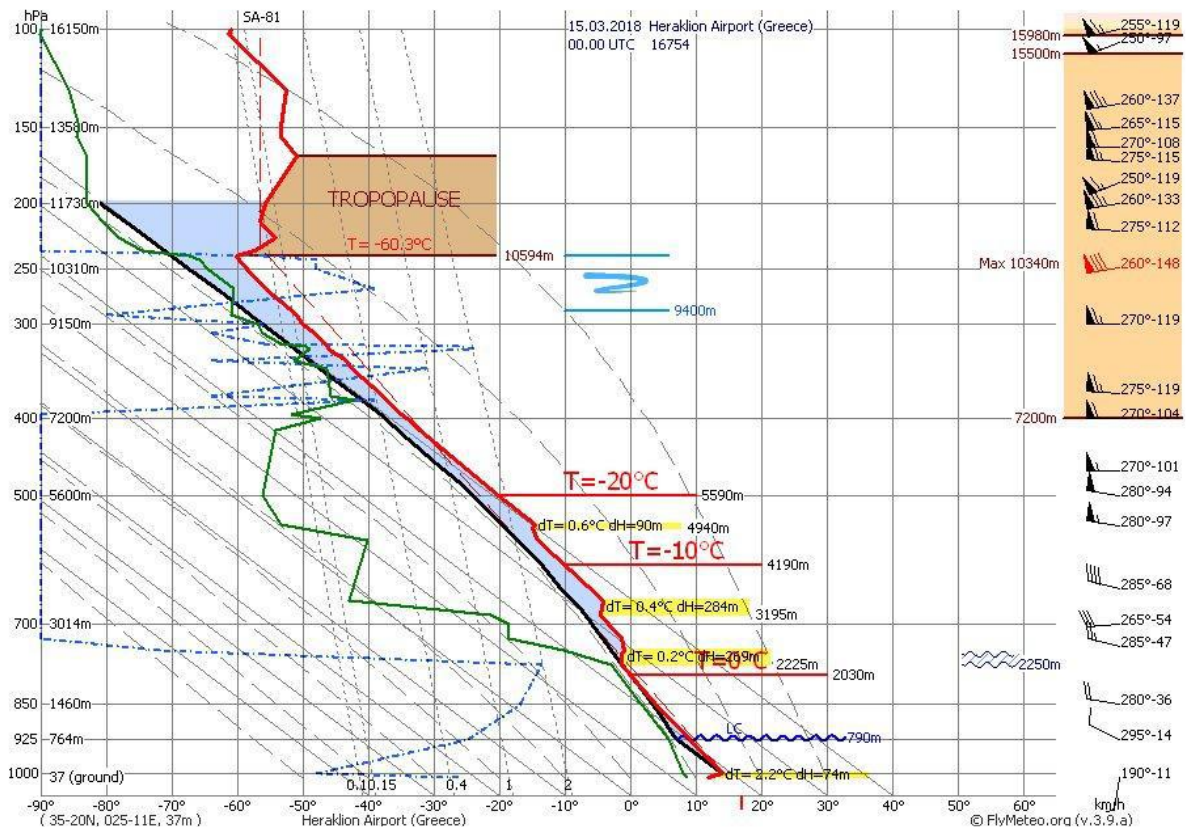


Рисунок Б.2 – Аэрологическая диаграмма пункта радиозондирования ИРАКЛИОН

Для диагноза и прогноза струйных течений применяются фактические и прогностические карты барической топографии уровней 400, 300 и 200 гПа, а также карты максимального ветра. Струйные течения обнаруживаются на них по сгущению изогипс в высотных фронтальных зонах. Более детальный анализ распределения ветра в струйных течениях основан на построении вертикального профиля ветра по данным радиозондирования атмосферы. Для авиационных потребителей крайне важна информация о направлении ветра в зоне струйных течений, максимальной скорости на оси струи, высоте оси струйного течения и толщине струи (высоте верхней и нижней границы струи). Для получения информации о струйных течениях используют чаще всего метод Рейтера.

Для рассматриваемого рейса: по пункту радиозондирования СЕГЕД ограничимся анализом аэрологической телеграммы: на изобарических поверхностях и тропопаузе сильного ветра (более 30 м/с или 108 км/ч) нет, среди особых ветровых точек данная скорость также не встречается. По пункту радиозондирования

БЕЛГРАД сильного ветра нет, по данным пункта радиозондирования ИРАКЛИОН наблюдаем струйное течение.

Таким образом, на протяжении всего маршрута полета ВС, включая участки взлета, набора высоты, снижения и посадки, выявлено два струйных течения. Первое обнаружено над Санкт-Петербургом и Таллином. Оно связано с высотной фронтальной зоной, его ось находится на высоте 7794 гпм с максимальной скоростью ветра 47 м/с (169 км/ч) на ней. Вертикальная протяженность его – около 5 км. Траектория полета обслуживаемого ВС с ним не пересекается.

Второе течение обнаружено над пунктом радиозондирования ИРАКЛИОН. Оно также связано с высотной фронтальной зоной – границей раздела между умеренной и тропической воздушными массами. Ось на высоте 10282 гпм с максимальной скоростью ветра 41 м/с (148 км/ч). Вертикальная протяженность – 6,5 км. Траектория полета ВС с ним пересекается в четвертой четверти полета на эшелоне и на этапе подхода к аэродрому Ларнака. Вместе с тем, следует учитывать, что отсутствие сильного ветра на аэрологической диаграмме пункта радиозондирования еще не означает отсутствие струйного течения. Метеоролог проанализировал карты АТ-500 – АТ-200. Анализ данных карт показал, что наблюдающиеся на протяжении второй и третьей четвертей полета на эшелоне на всех уровнях отсутствие температурных контрастов, разрежение изогипс и дивергенция потоков говорит о правильности нашего вывода.

Диагноз и прогноз атмосферной турбулентности. Среди метеоявлений, оказывающих влияние на маршрутный полет ВС, одним из наиболее опасных является атмосферная турбулентность, вызывающая интенсивную болтанку, под которой понимается резкое перемещение ВС в вертикальной плоскости. Болтанка, особенно сильная, явление довольно редкое. Тем не менее, внезапное попадание ВС в зону интенсивной турбулентности может быть причиной авиационных происшествий. В авиационных метеопрогнозах указывается нижняя и верхняя границы зоны турбулентности и ее интенсивность. Для прогноза атмосферной турбулентности, вызывающей болтанку ВС, используются как синоптические, так и расчетные методы.

Анализ аэрологических диаграмм показал, что нигде на маршруте полета ВС не складываются условия, отвечающие критериям наличия умеренной или сильной турбулентности, вызывающей болтанку ВС.

Диагноз и прогноз облачности. Условия полета ВС определяются пространственной структурой облачности (высотой верхней и нижней границ, вертикальной мощностью, расслоенностью, толщиной облачных слоев и безоблачных прослоек), ее микрофизическими характеристиками, температурным режимом, водностью и турбулентным состоянием. Облачность существенно сказывается на самолетовождении, усложняет визуальное наблюдение и ориентировку в пространстве, оказывает влияние на профиль полета и выбор маршрута, затрудняет выполнение маневров на высоте.

Основные затруднения для пилотов при взлете и посадке связаны с облачностью и условиями видимости, которая зависит от высоты облаков, влажности и скорости ветра. Ухудшение видимости у земной поверхности чаще всего происходит при наличии низкой облачности. Высота нижней границы низких облаков довольно изменчива во времени и в пространстве. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки метеоусловий взлета, посадки ВС и полетов на малых высотах.

Для диагноза и прогноза облачности используют метод Лугченко, метод Гоголевой, а также данные радиолокационных наблюдений и данные радиозондирования атмосферы.

В качестве примера покажем определение степени конвективной облачности по данным пункта радиозондирования ИРАКЛИОН. Определим разность между максимальной дневной температурой и температурой в период ночного подъема РЗ: $\Delta T = 18^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C} = 6^{\circ}\text{C}$. Среднюю относительную влажность в слое от верхней границы приземной радиационной инверсии до поверхности 700 гПа рассчитаем, сведя данные радиозондирования в таблицу (см. табл. Б.2).

Таблица Б.2 - Средняя относительной влажности слоя от верхней границы приземной инверсии до поверхности 700 гПа над пунктом радиозондирования ИРАКЛИОН

Р, гПа	Н, м	T, °C	γ , °C/100 м	D, °C	τ	f, %
1000	111	14	-	6	8	70
925	764	9	0,77	3,1	5,9	85
850	1460	3,8	0,75	2,1	1,7	90
776	2227	1,3	0,33	1,7	-0,4	92
757	2423	-1,3	1,33	7	-8,3	65
750	2496	-1,1	инверсия	9	-10,1	55
728	2724	-1,5	0,18	17	-18,5	15
700	3014	-3,5	0,69	15	-18,5	25
Среднее значение			0,68			62

По данным таблицы рассчитывается коэффициент стратификации:

$$K_{стр} = \frac{0,3\Delta TR_{cp}}{(T - T_d)_{cp}(1 - \gamma_{cp})} \approx 30,8,$$

где: R_{cp} - среднее значение относительной влажности в слое от верхней границы приземной инверсии (практически от 300-500 м) до высоты 3000 м;

$(1 - \gamma_{cp})$ - разность сухоадиабатического градиента и среднего градиента температуры в слое от верхней границы приземной инверсии до высоты 3000;

$(T - T_d)_{cp}$ - среднее значение разности между температурой и точкой росы в момент подъема РЗ в слое от земли до 200-500 м.

На основании полученных данных прогнозируется три балла внутримассовой конвективной облачности днем в момент максимального развития (11-12 UT) по аэропорту Ларнака.

Диагноз и прогноз опасных для авиации атмосферных явлений, обусловленных конвекцией. Развитие интенсивной конвекции и образование Cu cong. и Сb приводит к возникновению таких ОМЯ, как грозы, ливневые осадки, град и шквалы. Преднамеренный заход ВС в Сb категорически запрещается. В этих облаках

наблюдаются сильные восходящие и нисходящие (до 20-30 м/с) потоки, разряды молний, интенсивная турбулентность, обледенение и т.д.

Существует множество методик прогноза гроз, среди которых разработанные Н.В. Лебедевой, Г.Д. Решетовым, Коксом и другими отечественными и зарубежными учеными. Рассмотрим два метода прогноза гроз, которые получили наиболее широкое распространение среди синоптиков аэродромных метеослужб.

Метод Вайтинга. По данным утреннего зондирования атмосферы для пунктов заданного района вычисляется коэффициент K по формуле:

$$K = 2T_{850} - T_{500} - D_{850} - D_{700},$$

где буквой T обозначена температура воздуха, а буквой D дефицит температуры точки росы на соответствующем уровне.

Статистически установлено, что для средних широт при $K < 20$ гроз ожидать не следует. Если коэффициент K находится в пределах от 20 до 25, то ожидаются отдельные грозы, если K равен 25-30, то следует прогнозировать многочисленные грозы, а при K больше 30 ожидается повсеместное развитие гроз. Полученная область значений $K > 20$ будет зоной возможной грозовой деятельности.

Метод Фауста. Согласно методу Фауста, рассчитывается критерий неустойчивости атмосферы по формуле:

$$\Delta T_H = T_v - T_{500} + \Delta T_R,$$

где T_v - температура нулевого испарения, определяемая с помощью номограммы (см. рис. Б.3) с учетом температуры воздуха на уровне 850 гПа и среднего арифметического значения дефицитов температуры точки росы на уровнях 850, 700 и 500 гПа. Наклонные линии на рисунке – температуры нулевого испарения.

Если среднее значение дефицита точки росы в слое 850-500 гПа больше 14°C , то гроз в пункте ожидать не следует. ΔT_R - это поправка на кривизну изобар. Эта

величина определяется по данным табл. Г.3. Значения ΔT_H наносятся на карту и проводится изолиния $\Delta T_H = 0$. В области, где $\Delta T_H > 0$, следует ожидать грозы.

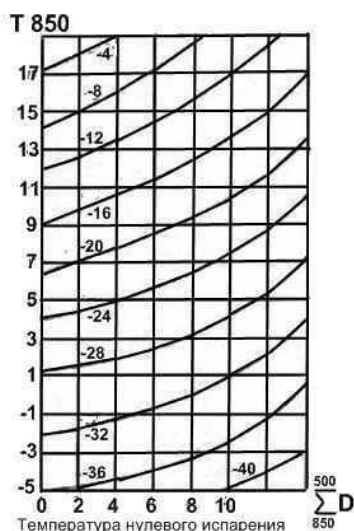


Рисунок Б.3 – График определения температуры нулевого испарения по Фаусту

Таблица Б.3 – Поправка на кривизну изобар

Кривизна	Радиус кривизны R, км			
	< 250	250-500	500-1000	> 1000
Циклоническая	2,0	1,4	1,0	0
Антициклоническая	-2,0	-1,4	-1,0	0

В таблицах Б.4 и Б.5 приведены результаты расчетов по методу Вайтинга и Фауста, соответственно.

Таблица Б.4 – Результаты расчетов по методу Вайтинга

Пункт	φ (широта)	λ (долгота)	T_{850}	D_{850}	D_{700}	T_{500}	K	D_{500}	D_{cp}	T_v	R^+	ΔT_R	ΔT_H
СПб	59°93'	30°34'	-16,1	2,2	7,0	-32,1	-9,3	15,0	8,1	--	600ц	1,0	--
Таллин	59°44'	24°75'	-13,3	7,0	30,0	-33,5	-30,1	30,0	22,3	--	0	0	--
Калининград	54°71'	20°45'	-5,9	15,0	22,0	-25,9	-22,9	9,0	15,3	--	0	0	--
Легноново	52°40'	20°95'	-4,3	0,7	5,0	-27,1	12,8	17,0	7,6	-38	1000ц	0	-10,9
Попрад	49°05'	20°30'	-2,7	0,0	0,2	-29,5	23,9	1,2	0,5	-33	1000ц	0	-3,5
Будапешт	47°50'	19°04'	-0,3	7,0	6,0	-29,1	15,5	4,6	5,9	-31	1100ц	0	-1,9
Сегед	46°25'	20°14'	0,2	9,0	8,0	-28,5	11,9	10,0	9,0	-32	1100ц	0	-3,5
Белград	44°79'	20°45'	0,4	1,1	3,5	-27,9	24,1	1,4	2,0	-29	1200ц	0	-1,1
Ираклион	35°34'	25°14'	3,8	2,1	15,0	-20,1	10,6	36,0	17,7	--	0	0	--

Таблица Б.5 – Результаты расчетов по методу Фауста

Пункт	φ (широта)	λ (долгота)	T_{150}	D_{150}	D_{700}	T_{500}	K	D_{500}	D_{cp}	T_v	R	ΔT_R	ΔT_n
СПб	59°93'	30°34'	-16,1	2,2	7,0	-32,1	-9,3	15,0	8,1	--	600ц	1,0	--
Бологое	57,88°	34,07°	-11,9	1,0	17	-27,3	-14,5	14,0	10,7	--	500ц	1,4	--
Москва	55,76°	37,62°	-1,9	1,2	1,6	-22,7	16,1	2,0	1,6	-32	700ц	1,0	-8,3
Рязань	54,61°	39,71°	-7,9	0,6	10,0	-22,9	-3,5	1,0	3,9	--	0		--
Воронеж	51,68°	39,21°	0,6	?	?	-26,7	?	1,2	?	?	0		?
Калач	50,42°	41,00°	1,2	0,1	0,4	-25,3	27,2	12	4,2	-29	0		-3,7
Ростов	47,24°	39,70°	2,4	2,7	2,0	-26,1	26,2	10,0	4,9	-28	500ц	1,4	-0,5
Туапсе	44,11°	39,08°	1,8	2,3	3,8	-25,1	22,6	17,0	7,7	-30	800ц	1,0	-3,9
Самсун	41,28°	36,34°	4,8	5,0	2,0	-24,9	27,5	3,4	3,5	-24	1000ц	0	0,9
Анкара	39,93°	32,86°	3,0	3,3	7,0	-24,5	20,2	10,0	6,8	-28	1100ц	0	-3,5

Составление вертикального разреза атмосферы, составление авиационных прогностических карт погоды.

Составление вертикального разреза атмосферы. Вертикальные разрезы атмосферы предназначаются для более наглядного представления условий погоды по какому-нибудь маршруту или району. При МО так называемых «особо важных рейсов» вертикальные разрезы составляются всегда. В отдельных случаях они могут составляться также при МО по трассам большой протяженности, полетов по международным трассам (для всех этапов полета ВС) и при обеспечении полетов в определенном районе. В крупных аэропортах вертикальные разрезы иногда составляются по постоянным направлениям. Различают три типа вертикальных разрезов: пространственные, временные и пространственно-временные разрезы. Пространственные разрезы строятся по результатам радиозондирования атмосферы, а также по данным инструментальных и визуальных наблюдений в один и тот же момент времени в нескольких пунктах. Временные разрезы составляются по данным наблюдений и измерений, а также по прогностическим данным в одном пункте. Пространственно-временные разрезы представляют собой графическое изображение авиационных прогнозов погоды по маршрутам полет ВС.

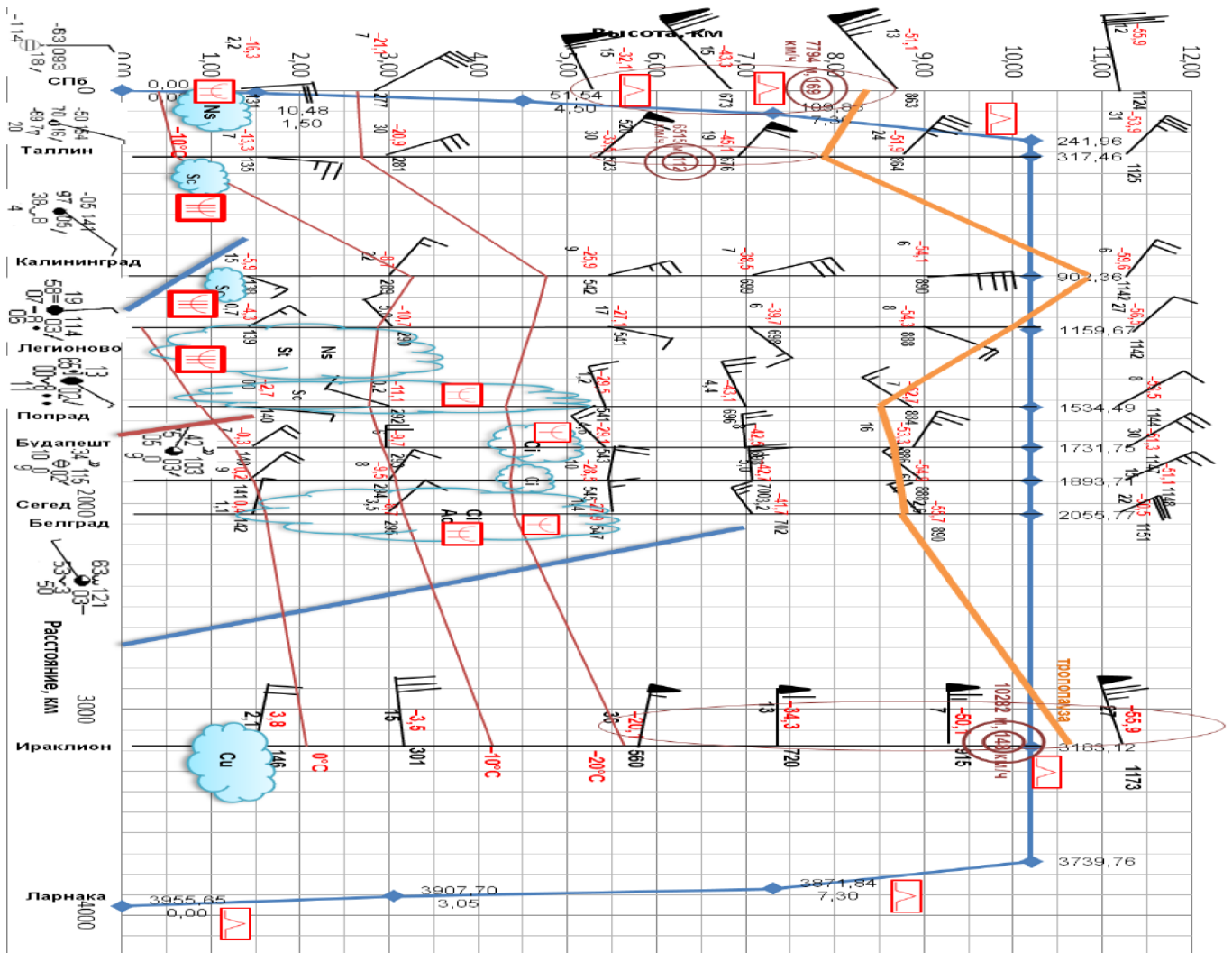


Рисунок Б.4 – Вертикальный разрез атмосферы

Составление и обработка авиационных прогностических карт погоды. Авиационные прогностические карты практически всегда используются при МО ВС ГА. Они составляются 4 раза в сутки на фиксированные сроки 00, 06, 12, 18 ч UT, а срок их действия считается равным 12 ч (по 6 ч в обе стороны от фиксированного времени).

1) Карта особых явлений погоды уровня FL250-630 (для высоких уровней) (рис. Б.5).

По трассе полета обслуживаемого ВС отмечаем вероятность образования Сб (отдельные, замаскированные в слоях других облаков) вертикальной протяженностью от уровня ниже FL 250 (7600 м, 25000 футов, 376 гПа) до уровня FL 250 в третьей четверти полета на эшелоне. Они ниже уровня полета более чем на

500 м и опасности не представляют. Также видим струйное течение с осью на FL310 (9450 м, 31000 футов, 287 гПа) с максимальной скоростью ветра 48 м/с (173 км/ч). Струя в зоне четвертой четверти полета на эшелоне и на первой половине этапа снижения (попутный ветер).

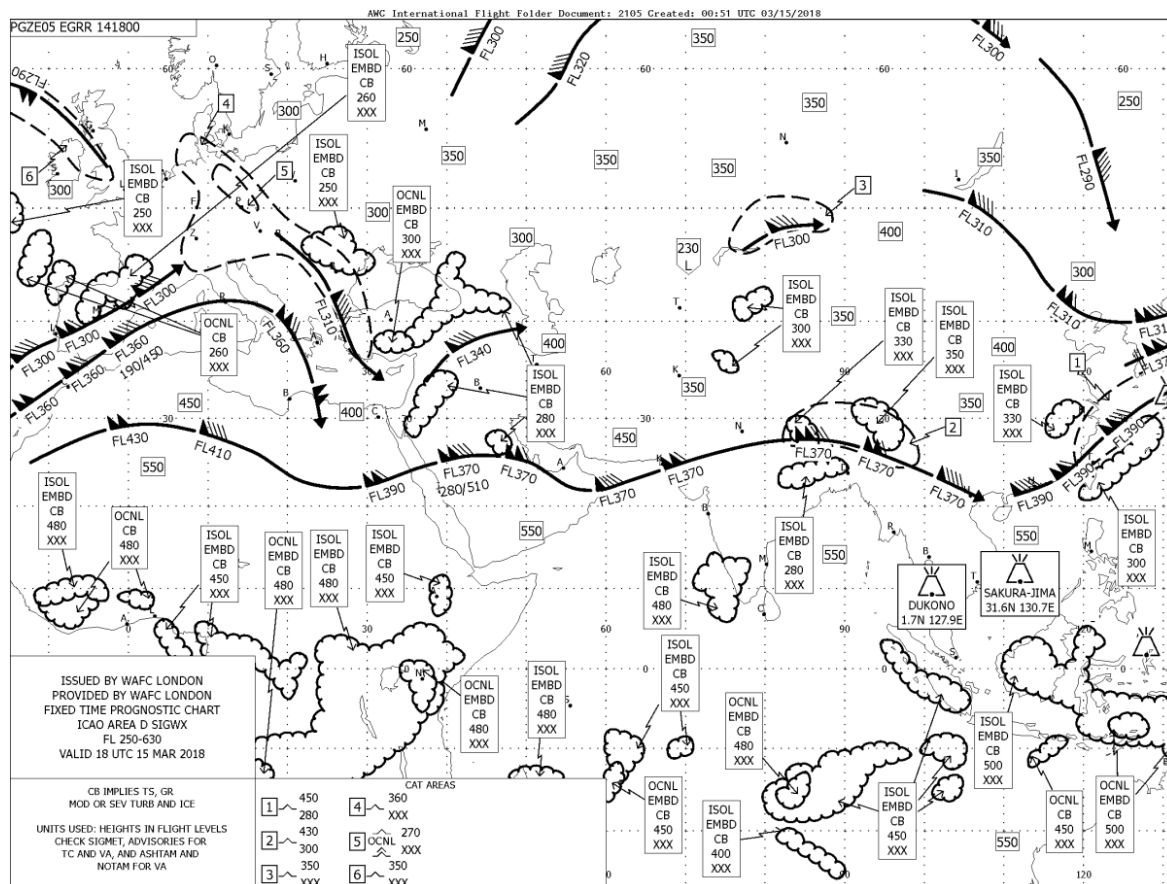


Рисунок Б.5 – Карта особых явлений погоды FL250-630

2) Рассмотрим карту температуры и ветра уровня FL340 (10350 м, 34000 футов, 250 гПа), ближайшей по высоте к эшелону полета (FL 335, 10200 м, 33500 футов, 256 гПа) (рис. Б.6). Ветер на эшелоне северо-западный и западный. Температура в стандартной атмосфере на уровне FL340 составляет $-52,275^{\circ}\text{C}$.

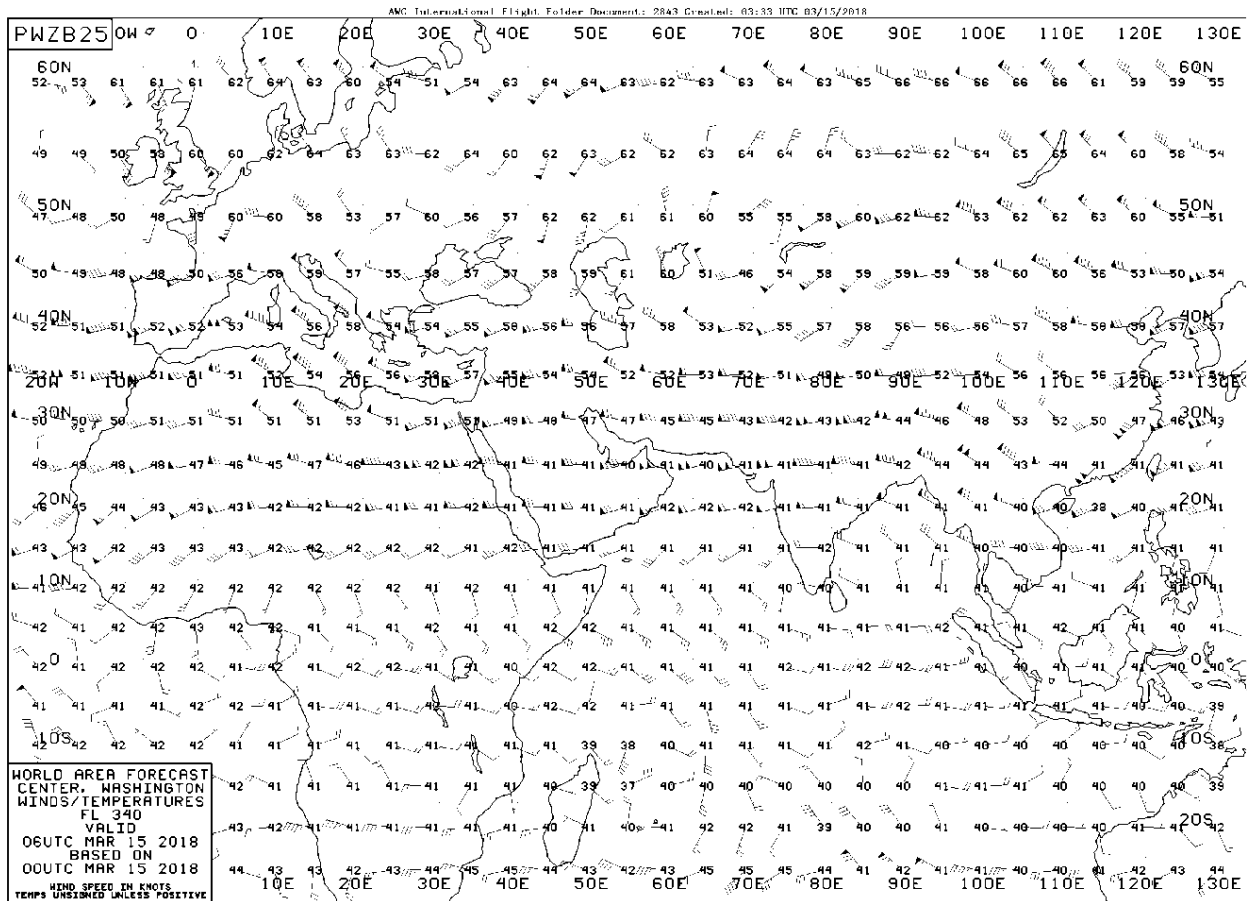


Рисунок Б.6 – Карта температуры и ветра FL340

Помимо рассмотренных данных метеоролог аэродромной метеослужбы анализирует сводки и прогнозы погоды по запасным аэродромам, районам полетов.

Метеоконсультация для экипажа обслуживаемого ВС

Примерный текст метеоконсультации для рассматриваемого авиарейса.

«Рейс FV 6617, Санкт-Петербург–Ларнака, авиакомпания «Аэрофлот». Эшелон полета FL 335, 33500 футов. Сегодня маршрут полета проходит по западной траектории в связи с прогнозируемой грозовой деятельностью над Турцией на холодном фронте в зоне подхода аэропорта Ларнака. Для Вашего рейса построен вертикальный разрез атмосферы. На нем наглядно представлены метеорологические условия полета.

Прогноз ветра и температуры на высотах по маршруту Санкт-Петербург–Ларнака. Прогностическая высотная карта эшелона полета FL 340 (34000 футов), действительна на 6 UT. Прогнозы основаны на синоптических данных за 00 UT.

Ветер на эшелоне северо-западный в первой половине и западный во второй половине маршрута. Его скорость составит от 72 км/ч в первой половине маршрута до 137 км/ч во второй, в зоне струйного течения западного направления. Температура воздуха на эшелоне будет от -53° до -64°C , что соответствует или ниже стандартных условий. Положительных аномалий температуры на FL 335 не диагностировано, и не они не прогнозируются.

Прогностическая карта особых явлений погоды между эшелонами полета FL250-630. Она действительна до 18 UT. Высота тропопаузы изменяется от 25000 футов на выходе на эшелон до 35000 в начале снижения. Большая часть полета на эшелоне пройдет над ней. Это видно на вертикальном разрезе. Полет на эшелоне с ветром северо-западного и западного направлений, без пересечения струйных течений на протяжении 2800 км. На расстоянии 3100 км от пункта вылета по траектории полета – пересечение оси струйного течения на высоте максимального ветра (148 км/ч, западо-юго-западный). Нахождение в зоне действия этого струйного течения на этапе снижения до высоты 5 км с сохранением западного (попутного) направления ветра и постепенным уменьшением скорости ветра до 100 км/ч на высоте 5 км.

По трассе полета отмечаем вероятность образования кучево-дождевых облаков (отдельные, замаскированные в слоях других облаков) вертикальной протяженностью от уровня ниже FL 250 (7600 м, 25000 футов, 376 гПа) до уровня FL 250 в третьей четверти полета на эшелоне. Они ниже уровня полета более чем на 500 м и опасности для воздушного судна не представляют.

Синоптическая обстановка. Сейчас Санкт-Петербург находится в зоне прохождения вторичного холодного фронта в тыловой части заполняющегося циклона (IV стадия развития) с центром над югом Архангельской области, смещающегося на восток со скоростью 40 км/ч.

В ближайшие три часа по аэродрому Пулково мы ожидаем слабый ливневый снег, низовую метель со снижением видимости до 2,5 км и кучево-дождевую облачность на высоте 400 м. Набор высоты с выходом на предполагаемый эшелон полета (FL 335) будет производиться с пробиванием слоисто-дождевой облачности

(толщина слоя около 1000 м с ВНГО 500 м) вторичного холодного анафронта с возможными маскированными кучево-дождевыми облаками. Температура в слое облачности $-10...-15^{\circ}\text{C}$, опасность умеренного обледенения (2 мм/мин). Ветер северный с поворотом на северо-западный на высоте 3 км, от 5 м/с у земли до 20 м/с на высоте 3 км. На высотах 5000-8500 м воздушное судно пересекает струйное течение западного направления (к югу от оси струи) с максимальной скоростью ветра 112 км/ч на 6,5 км.

Погода аэропорта Ларнака назначения будет определяться центральной частью многоядерного ослабевающего антициклона. В зоне подхода может наблюдаться слабая и умеренная турбулентность при ясном небе вследствие дневной конвекции разной интенсивности над сушей и островами Эгейского моря. По аэропорту Ларнака сегодня днем ожидается три балла внутримассовой кучевой облачности. Следует обратить внимание на слабый вертикальный сдвиг ветра в условиях бризовой циркуляции при посадке на аэродроме Ларнака.

Фактическая погода аэропорта Пулково, по последней выпущенной регулярной сводке METAR. Ветер 330° , 8 м/с; видимость больше 10 км, 4200 м в юго-восточном направлении; слабый ливневый снег, поземок; 5-7 октантов кучево-дождевой облачности на высоте 600 м, все небо закрыто облаками на высоте 960 м; температура воздуха -7°C , точка росы -12°C ; давление, приведенное к уровню моря, 1010 гПа; сдвиг ветра на ВПП R28L (правая и левая с курсом 280°); состояние всех ВПП (R88): мокрый снег, от 11 до 25% ВПП покрыто им, толщина покрытия 3 мм, коэффициент сцепления 0,5; в ближайшие 2 часа существенных изменений погоды на аэродроме не ожидается.

Прогноз TAF по аэропорту Ларнака. Прогноз разработан в 05:30 UT; начало действия прогноза 06:00 UT 15 марта, окончание действия прогноза 06:00 UT 16 марта; ветер 280° , 7 узлов; горизонтальная видимость у поверхности земли более 10 км; 3-4 октанта облачности на высоте 900 м (не Cu cong. и не Cb); с 09:00 до 12:00 UT 15 марта постепенное изменение ветра на 220° со скоростью 17 узлов; с вероятностью 30% временами в период с 11:00 до 15:00 UT 15 марта видимость

5000 м при умеренном ливневом дожде; с 17:00 до 20:00 UT 15 марта постепенное изменение ветра на 290°, 9 узлов.

Сообщений SIGMET для района полетной информации органом метеорологического слежения выпущено не было».

Характеристика систем радиозондирования атмосферы

Таблица В.1. - Характеристики СРЗ радиолокационного типа

№ п/п	Характеристика	МАРЛ-А	ВЕКТОР-М	ВИХРЬ
1	Рабочая частота, МГц	1680	1680	1680 403
2	СКО ошибки измерения:			
	- дальности, м	30	-	-
	- угла места, град	0,1	0,15	0,15
	- азимута, град	0,1	0,2	0,2
3	Тип антенной системы	АФАР	Пассивная АР	Пассивная АР
4	Предельные условия сопровождения РЗ:		-	-
	- по скорости подъема, м/с	12		
	- скорость горизонтального перемещения, м/с	35	-	-
5	Сохраняемость первичных данных зондирования	да	да	да
6	Наработка на отказ, ч	2000	-	

Таблица В.2. - Характеристики СРЗ спутникового типа

№ п/п	Характеристика	ПОЛЮС	ПОЛЕТ	ПОЛОНЕЗ
1	Рабочая частота, МГц	403	403	403
2	СКО ошибки измерения ПК РЗ:			
	- высота, м	10	10	10
	- плановые координаты, м	15	10	15
3	Вид сигнала телеметрии	цифровой	цифровой	цифровой
4	Ширина ДНА	360	360	360
	- в ГП, град.			
	- в ВП, град	170	90	170
5	Сохраняемость первичных данных зондирования	да	да	да

№ п/п	Характеристика	ПОЛЮС	ПОЛЕТ	ПОЛОНЕЗ
6	Период обновления телеметрической информации, с	2	2	2
7	Масса, кг.	75	20	40

Погрешности измерения пространственных координат радиозонда радиолокационным методом

На основе данных радиозондирования, представленных в [4], проведен анализ результатов сопровождения РЗ АРЛС типа АВК-1М, МАРЛ-А и ВЕКТОР-М. Анализ представленных данных позволил выявить существенные недостатки, в ряде случаев неустраняемые, которые присущи СРЗ радиолокационного типа (РЛТ). Эти недостатки связаны со следующими обстоятельствами.

1. Принципиальное ухудшение качества сопровождения при значительных удалениях РЗ из-за ограниченной точности измерения угловых координат по азимуту и углу места (см. рисунки Г.1 и Г.2). Формально среднеквадратические погрешности измерения углов места и азимута АРЛС БСС составляют $0,1-0,12^\circ$ и не зависят от дальности. В действительности, ввиду:

- определенной ширины ДН антенной системы БСС;
- ослабления мощности принимаемого сигнала РЗ;
- наличия замираний на предельных удалениях РЗ,

точность сопровождения РЗ по углам может быть значительно хуже номинальной.

По мере удаления РЗ может наблюдаться уменьшение амплитуды изменений азимута и угла места, которые вызваны перемещением РЗ в атмосфере. На предельных удалениях РЗ от БСС может наблюдаться эффект замираний сигнала РЗ, когда при его перемещении практически не изменяются значения азимута и угла места.

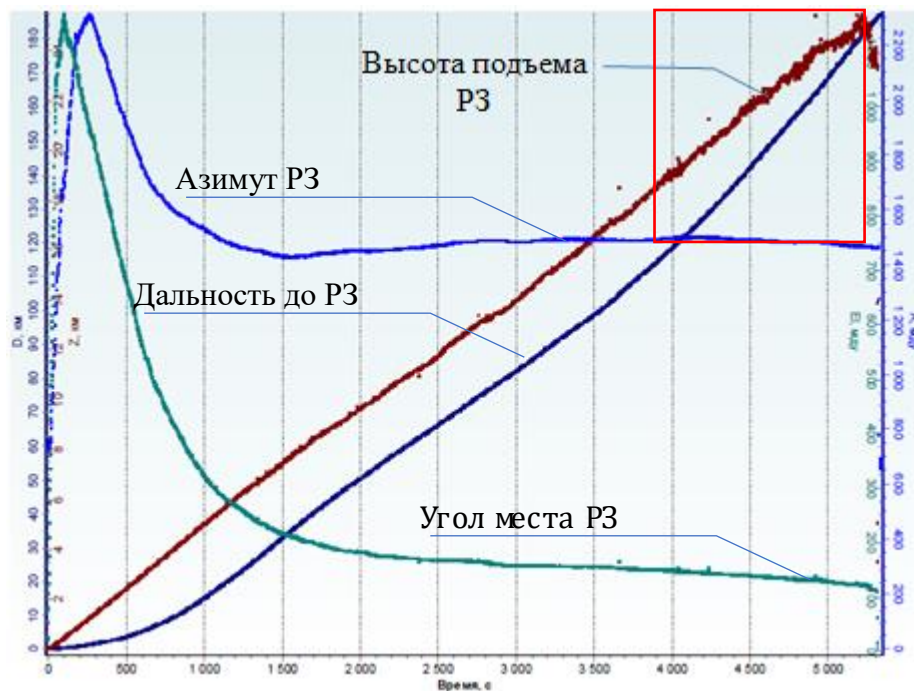


Рисунок Г.1 - Ухудшение точности определения высоты подъема РЗ на больших удалениях от БСС (АВК-1М)

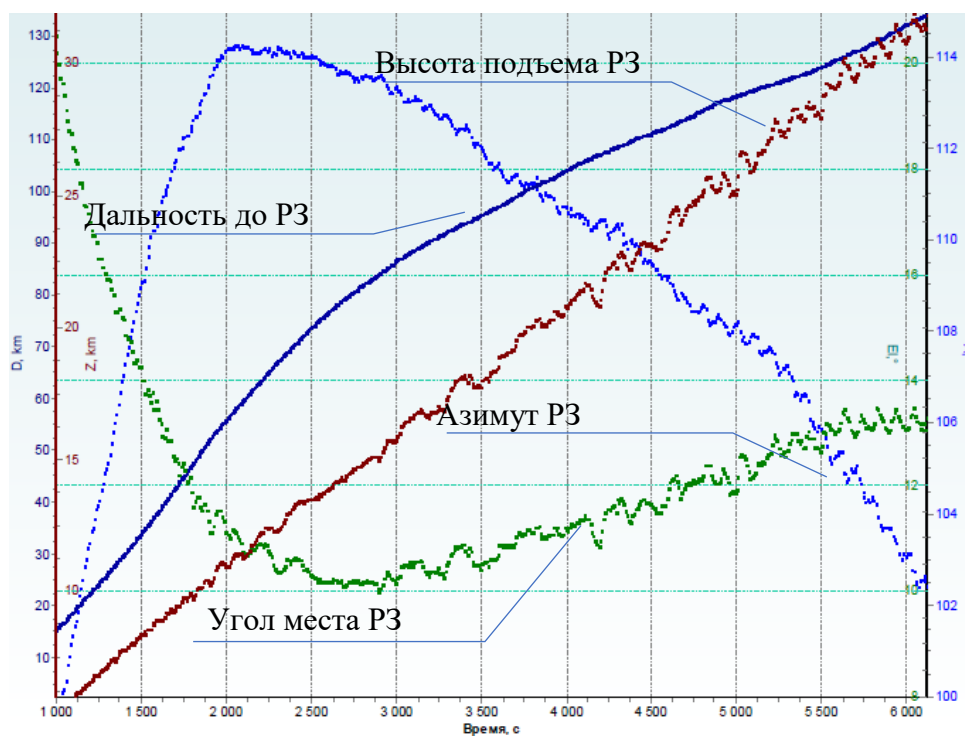


Рисунок Г.2 - Ухудшение точности определения высоты подъема РЗ на больших удалениях от БСС (ВЕКТОР-М)

Наиболее наглядными для анализа качества сопровождения РЗ по дальности и углу места, являются зависимости высоты подъема РЗ от времени.

При равномерном подъеме РЗ зависимость высоты подъема от времени имеет характер, близкий к линейному (на рис.Г.1 участок до 4000 с). При этом колебания скорости подъема РЗ невелики и плавно изменяются во времени. Ненадежное сопровождение РЗ проявляется в наличии скачков, изломов и других неоднородностей в зависимостях высоты подъема РЗ от времени, а также разброса в значениях скорости подъема. Из рис.Г.1, Г.2 [4] видно, что примерно с 4000 секунды полета (дальность до РЗ более 120 км) наблюдается ухудшение точности определения высоты подъема РЗ (увеличивается разброс вычисленных значений высоты). Это происходит по причине снижения точности определения угла места на больших удалениях РЗ.

2. Срывы автосопровождения РЗ по угловым координатам. ДН антенны БСС узкая, поэтому в условиях, например, сильного ветра в момент запуска возможны срывы автосопровождения РЗ по угловым координатам. При воздействии ветра на малых высотах подъема РЗ угловая скорость перемещения РЗ относительно антенной системы БСС может быть настолько высока, что БСС не успевает отреагировать на перемещение РЗ или редукторы азимута и угла места, не могут обеспечить необходимую скорость наведения антенны на РЗ.

Еще одной причиной ухудшения качества сопровождения РЗ может быть отсутствие прямой видимости места выпуска РЗ, например, при установке БСС на некоторую высоту (чаще всего крыша здания), что препятствует автозахвату РЗ при его старте.

Срыв автосопровождения РЗ в момент выпуска приводит к потере важнейшей информации о ветре, температуре и влажности в приземном слое. На рисунке Г.3 иллюстрируется случай, когда при срыве сопровождения РЗ в момент выпуска устойчивое сопровождение РЗ восстанавливается к 600 с полета РЗ, когда высота подъема составила уже примерно 2,5 км.

3. Срывы автосопровождения РЗ при переходе его через зенит. РЗ может пролетать над БСС сразу после выпуска при изменении направления ветра в приземном слое (рисунок Г.4) или «зависать» над антенной РЛС БСС на высотах при слабом ветре в соответствующих слоях атмосферы на высотах (см. рисунок Г.5).

В подобных случаях от аэрологов АЭ требуется высокая квалификация и определенные навыки для исключения возможности потери РЗ.

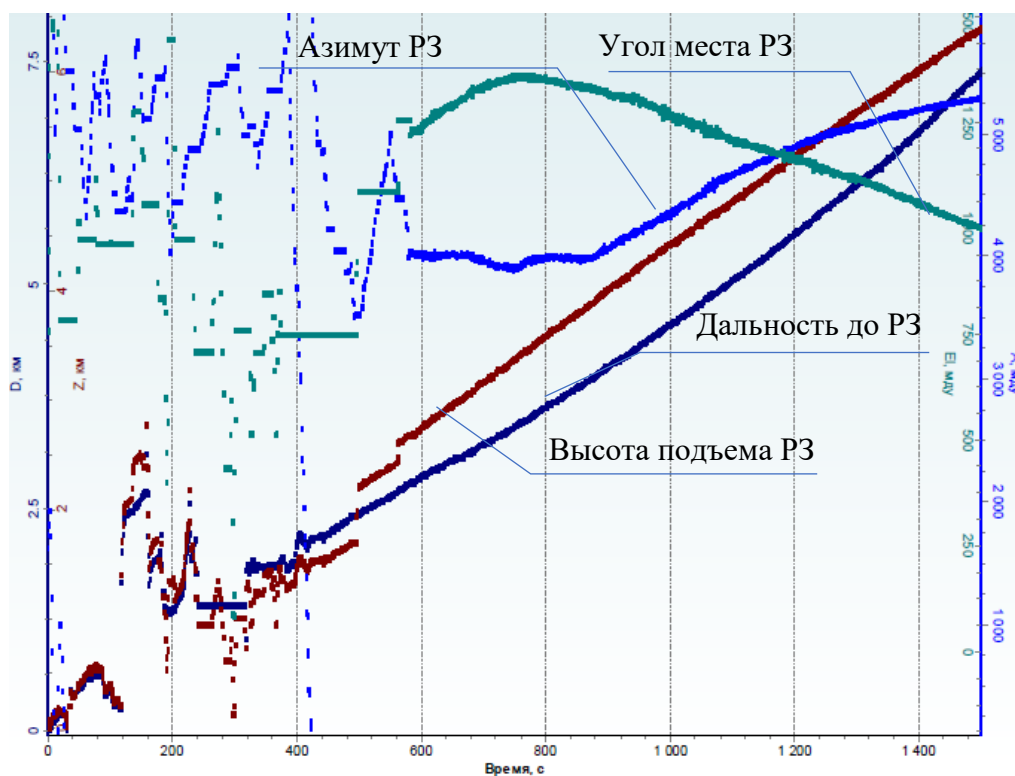


Рисунок Г.3 - Срыв сопровождения РЗ в момент выпуска (АВК-1М)

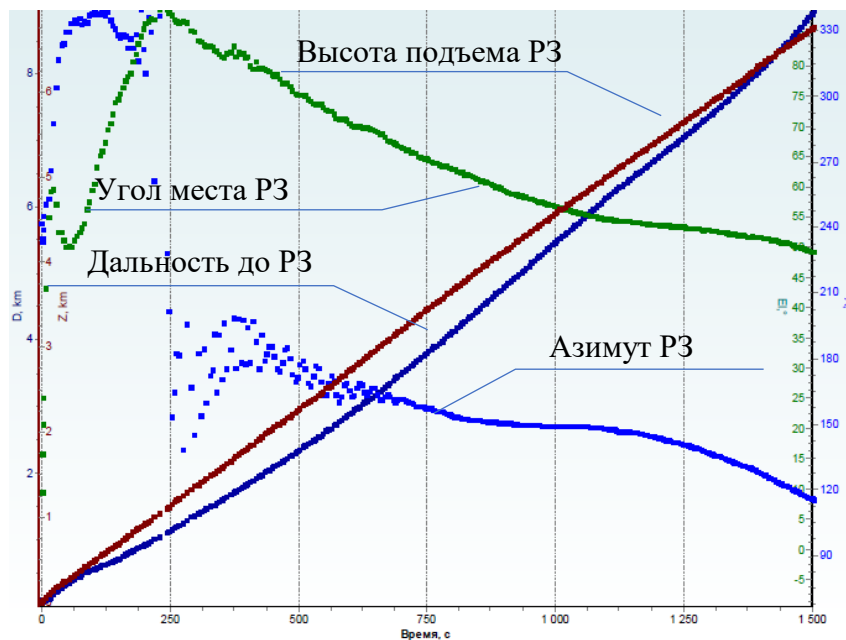


Рисунок Г.4 - Пролет РЗ через зенит сразу после выпуска (АВК-1М)

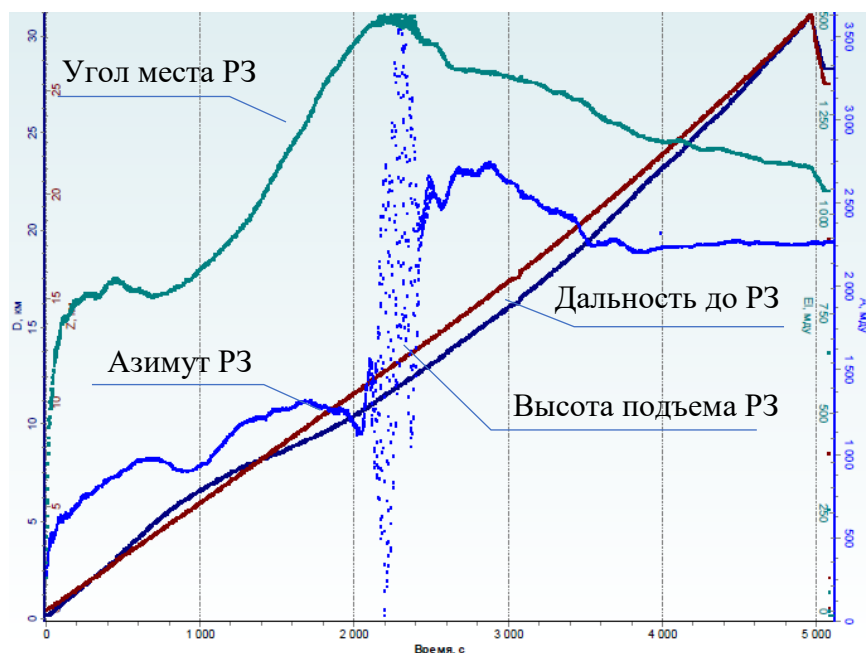


Рисунок Г.5 - Пролет P3 через зенит на больших высотах (АВК-1М)

При разработке АРЛС принимаются специальные конструктивные и программные меры к повышению надежности сопровождения P3 при переходе их через зенит, однако эта проблема является характерной для всех СРЗ РЛ.

4. «Скачки» в измерениях дальности и высоты подъема, вызванные переключением режимов сопровождения P3 (см. рисунок Г.6).



Рисунок Г.6 - «Скачок» дальности и высоты подъема P3 при переключении с маломощного на мощный передатчик (АВК-1М)

Переключение режимов сопровождения РЗ производится: у АВК-1(М) в случаях достижения дальностей сопровождения РЗ 500 м, 2,5 км, 3 км и 10 км; у МАРЛ-А(Т) в случаях достижения дальности сопровождения РЗ 2 км; у «Вектор-М» в случаях достижения дальностей сопровождения РЗ 1 км, 5 км и 10 км.

5. Возможность сопровождения РЗ боковыми лепестками ДНА системы БСС (рисунок Г.7). В момент выпуска РЗ может произойти захват и сопровождение боковым лепестком, особенно в случае сильного сигнала от РЗ. Программное обеспечение БСС снабжено средствами, обеспечивающими контроль захвата РЗ боковым лепестком ДН. Однако, помимо этого восстановление автосопровождения главным лепестком ДН требует наличия определенных навыков у аэролога АЭ. Сопровождение боковым лепестком ДН выражается в виде большого разброса значений координат РЗ и характеризуется также аномальными значениями скорости подъема РЗ вследствие недостоверного определения его высоты [4,102].

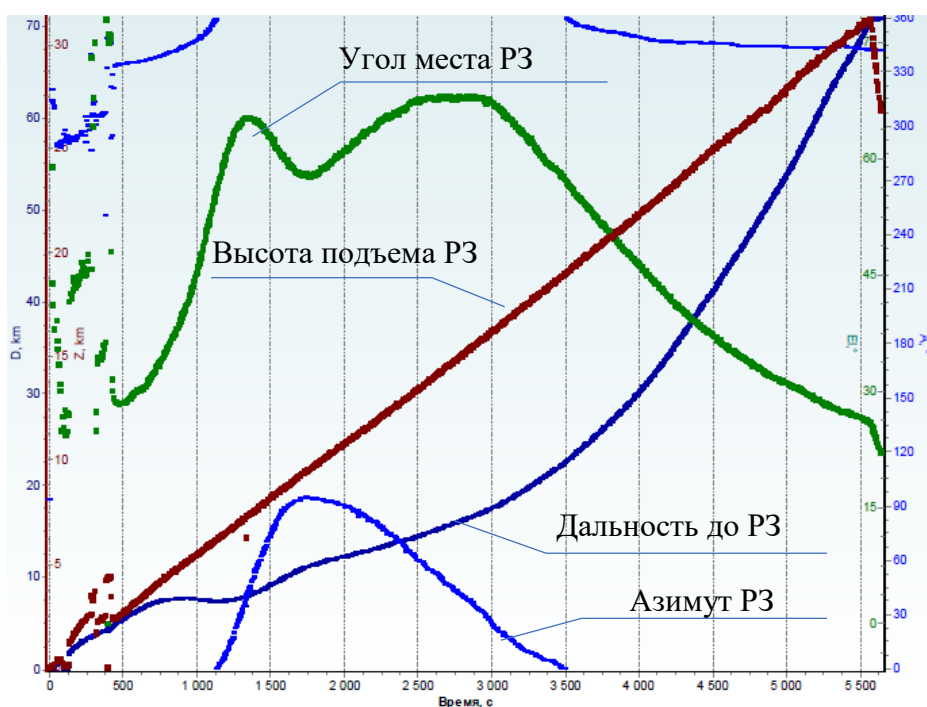


Рисунок Г.7 - Сопровождение РЗ боковым лепестком ДНА АРЛС (МАРЛ-А)

6. Влияние подстилающей поверхности на надежность сопровождение РЗ.

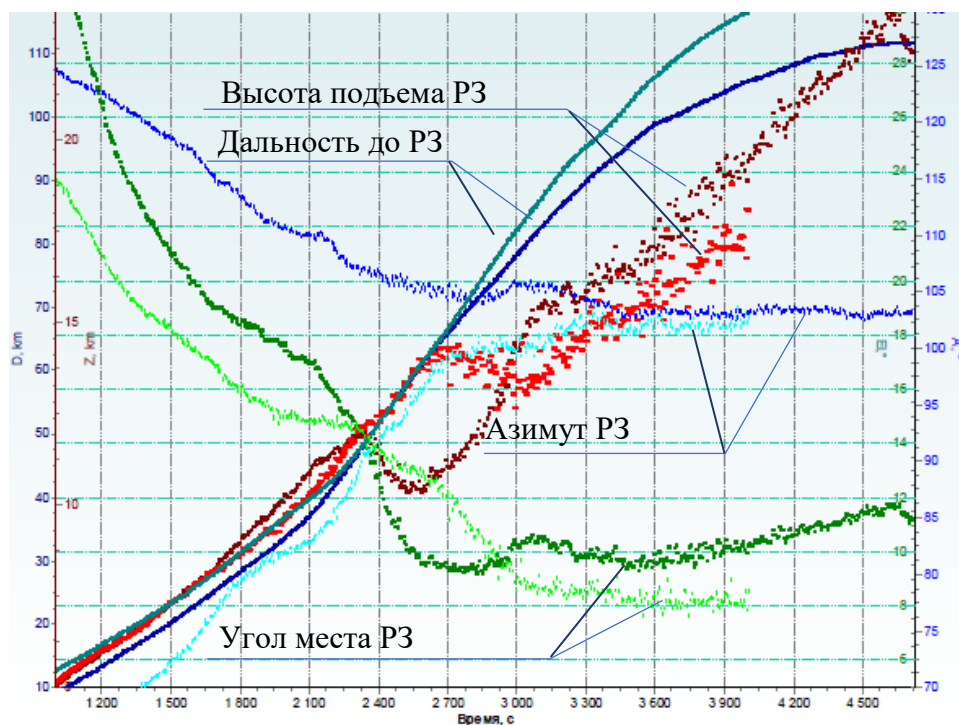


Рисунок Г.8 - Искажение измерений высоты подъема P3 при малых углах места для двух выпусков (МАРЛ-А)

Подстилающая земная поверхность при угле места менее 12° начинает оказывать влияние на надежность сопровождения P3. Это объясняется достаточно высоким энергетическим уровнем боковых лепестков ДН антенной системы БСС. В зависимости от характера подстилающей поверхности искажения могут носить как квазиколебательный характер с различным периодом и амплитудой, так и случайный характер, обусловленный изменениями фазы отраженного сигнала. При малых значениях угла места и высоких уровнях отражательной способности поверхности (например, водной глади) искажения сигнала могут достигать критических величин. Это также может привести к недостоверности результатов определения координат P3 (рисунок Г.8).

Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса

Динамика вектора состояния (3.23) описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением (3.24). Общее решение уравнения (3.24) определяется формулой Коши:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{\Phi}(t-t_0)\mathbf{X}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{\Phi}(t-\tau)\mathbf{C}\mathbf{U}(\tau)d\tau + \int_{t_0}^t \mathbf{\Phi}(t-\tau)\mathbf{G}\mathbf{N}(\tau)d\tau, \quad (\text{Д.1})$$

где $\mathbf{\Phi}(\tau)$ - фундаментальная матрица, определяемая на основе решения дифференциального уравнения:

$$\frac{d}{d\tau}\mathbf{\Phi}(\tau) = \mathbf{F}\mathbf{\Phi}(\tau), \quad \mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{I}.$$

Вектор математических ожиданий $\mathbf{M}_X(t)$ и матрица одномерных центральных моментов второго порядка $\mathbf{D}_X(t)$ вектора $\mathbf{X}(t)$ определяются соответствующими выражениями:

$$\mathbf{M}_X(t) = \mathbf{\Phi}(t-t_0)\mathbf{M}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{\Phi}(t-\tau)\mathbf{C}\mathbf{U}(\tau)d\tau, \quad (\text{Д.2})$$

$$\mathbf{D}_X(t) = \mathbf{\Phi}(t-t_0)\mathbf{D}_{X0}\mathbf{\Phi}^T(t-t_0) + \mathbf{D}_1(t), \quad (\text{Д.3})$$

где: $\mathbf{D}_1(t)$ - матрица приращений, удовлетворяющая уравнению:

$$\dot{\mathbf{D}}_1(t) = \mathbf{F}\mathbf{D}_1(t) + \mathbf{D}_1(t)\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T, \quad (\text{Д.4})$$

где: \mathbf{Q} - матрица интенсивностей БГШ.

Выражения (Д.2)-(Д.4) позволяют оценить динамику изменения компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$, а также их априорных дисперсий на заданном интервале времени T , с учетом различных условиях полета РЗ в атмосфере и группировки рабочего созвездия НКА.

На рис. Д.1 и рис. Д.2 представлены результаты расчетов приращений априорных математических ожиданий и дисперсий высоты подъема и скорости подъема РЗ в атмосфере. Характер изменений во времени приращений априорных математических ожиданий высоты подъема и скорости подъема РЗ позволяет сделать вывод, что на полуинтервалах $(t_k, t_k + T)$ типовой является ситуация, при которой детерминированным изменением (сносом) параметров движения РЗ пренебречь нельзя, так как приращения математических ожиданий на отрезке времени T практически соизмеримы со значениями погрешностей оценивания этих компонент. Указанное обстоятельство позволяет упростить математическую модель (3.24) за счет упрощения коэффициента сноса $\mathbf{F}\mathbf{X}(t)$ на отрезке времени T . При этом, в виде квазислучайных процессов сохраняются лишь те компоненты $\mathbf{X}(t)$, для которых детерминированным изменением на полуинтервале $(t_k, t_k + T)$ пренебречь нельзя.

Приращение априорных дисперсий высоты подъема и скорости подъема РЗ на несколько порядков меньше, чем максимальная погрешность оценивания этих параметров.

Таким образом, результаты анализа изменения во времени компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ позволяют динамику компонент вектора состояния описать квазислучайным процессом:

$$\mathbf{X}(t) = f(t, \mathbf{X}_k), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (\text{Д.5})$$

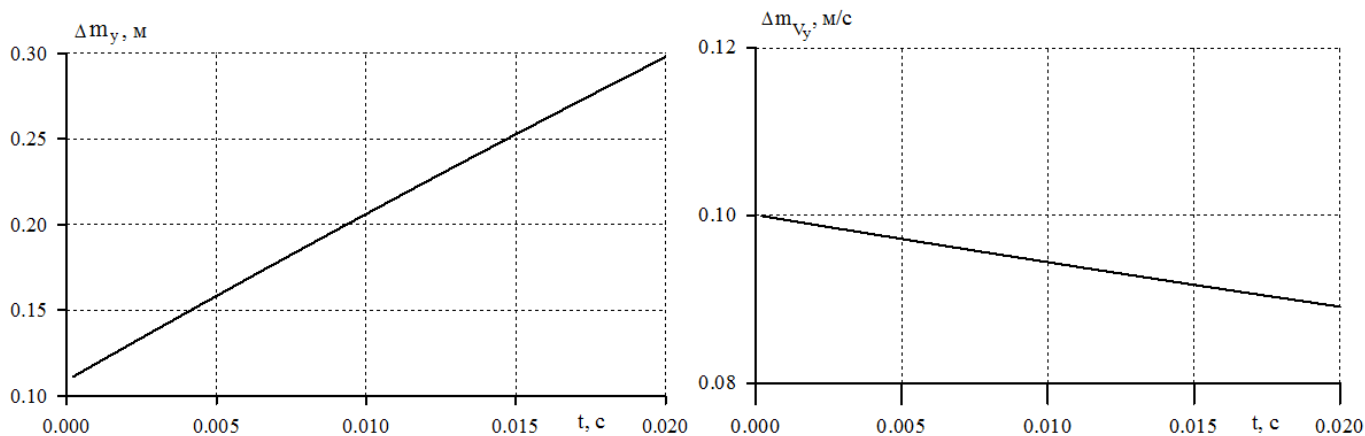


Рисунок Д.1. Приращения априорных математических ожиданий высоты и скорости подъема РЗ

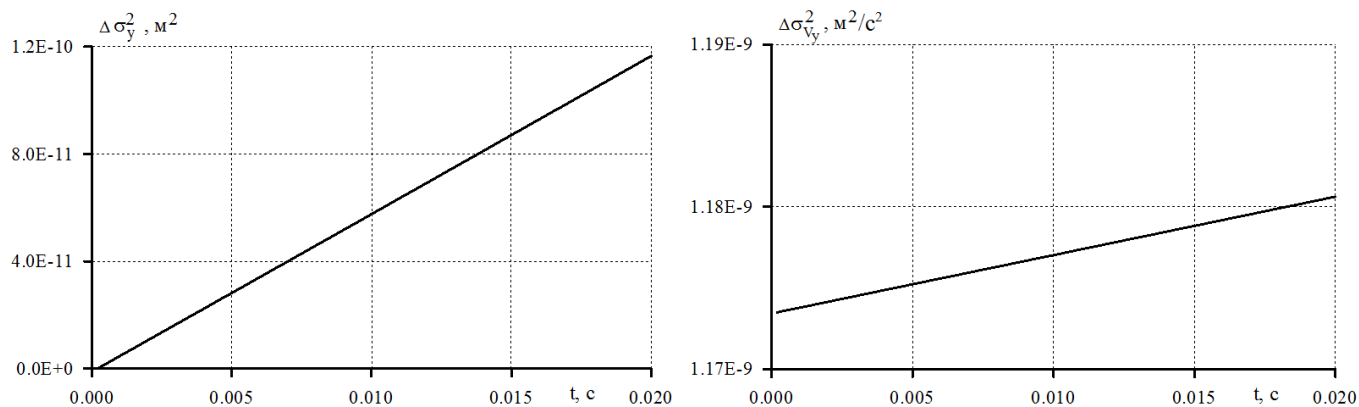


Рисунок Д.2. Приращения априорных дисперсий высоты и скорости подъема РЗ

Таким образом, результаты анализа изменения во времени компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ позволяют динамику компонент вектора состояния описать квазислучайным процессом:

$$\mathbf{X}(t) = f(t, \mathbf{X}_k), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (\text{Д.6})$$

где: $f(\cdot)$, - известная векторная функция, конкретный вид которой можно представить выражениями:

$$x(t) = x_k + V_{xk}t, \quad y(t) = y_k + V_{yk}t, \quad z(t) = z_k + V_{zk}t,$$

$$V_x(t) = V_{xk}, \quad V_y(t) = V_{yk}, \quad V_z(t) = V_{zk},$$

$$a_x(t) = a_y(t) = a_z(t) = 0,$$

$$\varphi_{pi}(t) = \varphi_{pik} + \Delta\omega_{pik}t + \frac{\omega_p}{c} \frac{dd_{\Sigma}(t)}{dt}t, \quad \Delta\omega_{pi}(t) = \Delta\omega_{pik},$$

$$\varphi_{pl}(t) = \varphi_{plk} + \Delta\omega_{plk}t + \frac{\omega_p}{c} \frac{d\hat{d}_{pl}(t)}{dt}t, \quad \Delta\omega_{pl}(t) = \Delta\omega_{plk}.$$

Переход к модели (Д.6) вполне обоснован тем, что на малых интервалах времени для низкодинамичного объекта, которым является РЗ, детерминированное изменение (снос) части компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ может быть велико и им пренебречь нельзя, а приращение центральных моментов второго порядка (диффузия) этих компонент за это же время мало и им можно пренебречь при требуемой точности оценивания.

Учитывая (Д.6) наблюдения (3.12) и (3.13) можно представить в виде:

$$\xi_p(t) = s_p(t, f(t, \mathbf{X}_k), \theta) + n_p(t), \quad (\text{Д.7})$$

$$\xi_{pl}(t) = s_{pl}(t, f(t, \mathbf{X}_k)) + n_{pl}(t). \quad (\text{Д.8})$$

Представление модели вектора состояния в форме (Д.6) для малых интервалов времени, характерных для радиосигналов СРНС и АРЛС, позволяет обоснованно упростить математические модели вектора состояния и перейти от нелинейной системы дифференциальных уравнений к системе линейных уравнений с постоянными коэффициентами, определяемой квазислучайным процессом.