

На правах рукописи



ЗЯБКИН СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЗОН ВЕРОЯТНОГО
ОБЛЕДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ В
РАЙОНЕ АЭРОДРОМА**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта».

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» ФГБОУ ВО МГТУ ГА
Болелов Эдуард Анатольевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Управление и контроль в технических системах» (УКТС) Муромского института (филиала)
ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»
Ростокин Илья Николаевич

Кандидат технических наук, доцент, начальник
научно-исследовательского комплекса программного обеспечения и моделирования акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» им. А.И. Шокина»
Каргашин Юрий Дмитриевич

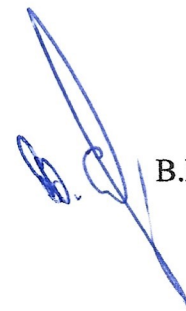
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
(ФГУП ГосНИИ ГА)

Защита состоится «4» октября 2023 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор



В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Безопасность и регулярность полетов воздушных судов гражданской авиации в существенной мере зависят от опасных метеоявлений, к числу наименее изученных относится обледенение воздушного судна (ВС).

В настоящее время на аэродромах гражданской авиации для определения пространственных зон вероятного обледенения и их прогноза используется аэрологическая информация о профилях температуры и влажности. Изменчивость температурных и влажностных полей в атмосфере в сочетании с низким пространственно-временным разрешением полученных аэрологических данных не позволяют диспетчеру управления воздушным движением (УВД) иметь достоверную картину о зонах обледенения, необходимую для производства полетов.

Большие перспективы в вопросах обеспечения диспетчера УВД информацией об опасных метеоявлениях открываются за счет внедрения аэродромных метеорологических радиолокационных комплексов (АМРЛК). АМРЛК является уникальным инструментом для обеспечения детальных и своевременных наблюдений за атмосферными осадками. Приоритетным направлением развития АМРЛК на современном этапе является реализация в них полного поляризационного приема

Однако анализ существующих метеорологических комплексов, в том числе МРЛК БАЗ «Монокль», выявил **противоречие практического характера** между отсутствием в отечественных разработках метеорологических радиолокационных комплексов возможности классификации зон вероятного обледенения и необходимостью повышения ситуационной осведомленности диспетчеров УВД и экипажей ВС о зонах обледенения в районе аэродрома.

Следствием противоречия практического характера является **противоречие научного характера** между необходимостью обеспечения высокой достоверности классификации зон вероятного обледенения ВС в районе аэродрома с одной стороны, и отсутствием алгоритмов классификации зон вероятного обледенения ВС в перспективных АМРЛК, с другой стороны.

В диссертации для разрешения указанных противоречий решается актуальная **научно-техническая задача** - разработка алгоритмов классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в районе аэродрома для их использования в аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах. Актуальность научно-технической задачи обусловлена прежде всего тем, что внедрение АМРЛК с возможностью классификации зон вероятного обледенения в оперативную практику МОП обеспечивает:

- достоверной метеорологической информацией экипажи ВС на этапах захода на посадку, взлёта и посадки воздушного судна;

- достоверной метеорологической информацией диспетчеров управления воздушным движением (прежде всего диспетчеров старта и посадки, диспетчеров «круга» и диспетчеров «подхода»),

что позволит повысить безопасность полетов в районе аэродрома.

Степень разработанности темы исследования

Гипотеза о возможности наблюдения за фактической погодой при помощи радиолокатора была предложена Д. Райдом в 1941 году. В дальнейшем за основу радиолокационной метеорологии послужили труды Д. Атласа, Х. Голдштейна, А. Сигерто, А. Бенга, Д. Керра, М. Лигда, Р. Векслера, Д. Маршала и В. Пальмера. С 1944 по 1950 гг. было установлено, что наличие в радиоэхе «яркой полосы» зависит от состояния фазы гидрометеоров, также был осуществлён анализ зависимостей между отражаемостью радиоэха, размерами и скоростью выпадения гидрометеоров. В 50-х гг. XX века были получены результаты в вопросах поляризации, измерения осадков, отображения радиолокационной отражаемости, процесса флуктуации сигналов, слежения за ураганами с использованием радиолокаторов. Далее начали использовать методы измерения, связанные с эффектом Доплера, в результате чего впервые были

получены карты ветровых параметров и характеристик (радиальная скорость, её ширина спектра, векторное поле скорости, турбулентность, горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра).

Теоретические и прикладные вопросы метеорологического обеспечения, повышения оправдываемости метеопрогнозов, разработки методов измерения параметров атмосферы излагаются в трудах А.М. Баранова, О.Г. Богаткина, О.В. Васильева, В.Г. Глазунова, В.Ф. Говердовского, А.Г. Горелика, А.С. Зверева, А.И. Логвина, Ю.П. Переведенцева, В.Д. Рубцова, Л.Е. Рудельсона, Г.Г. Щукина.

Значительный вклад по вопросам поляризации радиоволн и применения поляризации в радиолокации внесли работы А.Б. Шупяцкого, В.А. Потехина, С.И. Поздняка, В.А. Метелицкого, К.Г. Гусева, В.В. Богородского, Д.Б. Канарейкина, А.И. Козлова, В.А. Сарычева, А.И. Логвина, однако все эти авторы, внесшие весомый вклад в развитие поляризационной радиолокации для различных применений, практически не касались метеорологической радиолокации.

Как ни странно, вопросы теории и практики применения поляризационных методов в метеорологической радиолокации на протяжении ряда лет не получили должного развития в России. Лишь недавно разработан первый экспериментальный метеорологический радиолокатор С-диапазона с возможностью использования двойной поляризации. К сожалению, проводившиеся в 70-80 годы в ЦАО и ГГО работы А.Б. Шупяцкого и А.В. Рыжкова по поляризационным измерениям в метеорологии были давно прекращены.

В то же время в США, Нидерландах, Великобритании, Германии и других странах это направление развивалось очень интенсивно последние 20 лет и в результате уже существуют серийные модели когерентных поляризационных метеорологических радиолокаторов, которые внедрены в практику метеорологии, климатологии, гидрологии и метеобеспечения полетов авиации. В США уже функционирует развитая сеть поляриметрических метеорадиолокаторов и имеются долгосрочные планы по ее дальнейшему совершенствованию. Значительный вклад внесли работы Р. Довиака, Д. Зрничя, В. Бринги, В. Чандрасекара, Д. Страки, Д. Вивекандана, М. Вольде, Г. Джанга, Т. Селиги, Х. Прапатчера, Х. Парка, Д. Ламба и П. Херзег.

При этом, несмотря на значительные успехи в разработке метеорологических радиолокационных комплексов, в том числе малогабаритных, по-прежнему остается нерешенной задача разработки алгоритмов классификации зон вероятного обледенения воздушных судов для повышения ситуационной осведомленности экипажей ВС, диспетчеров УВД и аэродромных служб о фактической метеообстановке в районе аэродрома.

Целью работы повышения достоверности классификации пространственных зон вероятного обледенения воздушных судов путем комплексного анализа радиолокационных поляриметрических и температурных характеристик атмосферы.

Для достижения цели работы решается **комплекс взаимосвязанных задач:**

1) сравнительный анализ методов и технических средств обнаружения и классификации, опасных метеоявлений в районе аэродрома;

2) разработка имитационной модели радиолокационных отражений от различных видов осадков, характерных для метеоявлений, вызывающих обледенение ВС;

3) разработка алгоритма оценки фазового состояния гидрометеоров радиолокационным методом в интересах обнаружения зон опасного обледенения;

4) разработка алгоритма оценки фазового состояния гидрометеоров радиолокационным методом в интересах обнаружения зон опасного обледенения;

5) разработка рекомендаций по реализации алгоритмов классификации зон вероятного обледенения в аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах X-диапазона типа «Монокль».

Объектом исследования является аэродромный метеорологический радиолокационный комплекс с полным поляризационным приемом.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы классификации зон вероятного обледенения воздушных судов.

Личный вклад автора. Автором лично:

- проведен анализ методов и технических средств обнаружения и классификации, опасных метеоявлений в районе аэродрома и обоснована необходимость повышения точности классификации зон вероятного обледенения в ближней аэродромной зоне в интересах повышения ситуационной осведомленности диспетчеров управления воздушным движением;

- предложена функционально ориентированная имитационная модель выходных данных поляриметрического аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРЛК) при первичной обработке отраженных сигналов от различных типов гидрометеоров в условиях потенциального существования зон вероятного обледенения воздушных судов, формирующая поляриметрические продукты: радиолокационную отражаемость, дифференциальную отражаемость, удельную дифференциальную фазу и линейное деполаризационное отношение;

- доказана адекватность имитационной модели выходных данных поляриметрического АМРЛК путем сравнения результатов имитационного моделирования и функций принадлежности в S-диапазоне частот, полученных по экспериментальным данным;

- разработан уникальный алгоритм классификации зон вероятного обледенения воздушных судов, основанный на нечеткой логике, для использования в АМРЛК;

- разработан уникальный нечетко-логический классификатор гидрометеоров, специфичных явлению вероятного обледенения воздушных судов, включая выбор и обоснование словаря входных признаков, алфавита выходных классов и метода классификации;

- выполнено первичное обучение алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов при помощи данных имитационного моделирования;

- разработаны практические рекомендации по реализации алгоритмов классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в перспективных аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах X-диапазона типа «Монокль».

В диссертационной работе применяются следующие **методы исследования**: методы цифровой обработки сигналов, методы теории множеств, методы дискретной математики, методы теории распознавания образов, методы нечеткой логики, методы теории ошибок, методы математического моделирования, методы теории вероятности и математической статистики

Границы исследования: в работе предложены модели и алгоритмы классификации зон вероятного обледенения воздушных судов радиолокационным методом при слоистой и слоистообразной облачности и в отсутствие грозы и града.

Научная новизна исследования состоит в развитии теоретических методов метеорологической радиолокации применительно к аэронавигационному обеспечению полетов. В настоящей работе впервые:

- предложена математическая модель расчета амплитуд радиолокационных волн, отраженных от гидрометеоров, потенциально способных вызвать обледенение воздушных судов, отличающаяся от известных тем, что впервые гидрометеоры переохлажденной жидкости представляются в виде ансамбля сферических частиц с физическими, статистическими и диэлектрическими свойствами, описываемыми частными моделями, а в качестве метода расчета применен метод T-матриц;

- предложена уникальная имитационная модель выходных данных поляриметрического аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса при обработке отраженных сигналов от различных типов гидрометеоров, специфичных явлению вероятного обледенения воздушных судов, отличающаяся тем, что в ней на основе методов Монте-Карло формируется случайная реализация свойств ансамбля гидрометеоров, расчет

радиолокационных отражений от каждой частицы и усреднение результата по ансамблю для расчета поляриметрических продуктов аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса;

- разработан уникальный нечетко-логический классификатор типов гидрометеоров для применения в перспективных аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах X-диапазона, отличающийся от известных: словарем входных признаков, включающих радиолокационную и дифференциальную отражаемости, линейное деполаризационное отношение и удельную дифференциальную фазу; алфавитом выходных классов, включающим капли дождя, ориентированные кристаллы льда, морось, сухой и мокрый снег; трапециевидными функциями принадлежности;

- предложена методика обучения нечетко-логического классификатора типов гидрометеоров по радиолокационным данным X-диапазона;

- разработан уникальный алгоритм классификации зон вероятного обледенения воздушных судов, отличающийся тем, что впервые для классификации зон обледенения воздушных судов был применен метод нечеткой логики и в качестве входных признаков были использованы поляриметрические продукты аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса (радиолокационная и дифференциальная отражаемость, линейное деполаризационное отношение, удельная дифференциальная фаза).

Теоретическая значимость результатов работы заключается в:

- развитии методов моделирования опасных для авиации метеоявлений;
- развитии научно-методического аппарата классификации опасных для авиации метеоявлений.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что они позволяют:

- улучшить ситуационную осведомленность диспетчера управления воздушным движением и экипажа воздушного судна о зонах обледенения в районе аэродрома;
- повысить достоверность прогноза зон вероятного обледенения в радиусе 100 км от аэродрома;

Самостоятельную практическую значимость имеет:

- программная реализация алгоритма имитации метеорологической обстановки в условиях явления вероятного обледенения воздушных судов на основе расчета амплитуд радиоволн, отраженных от ансамбля сфероидных гидрометеоров;

- программная реализация алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов для перспективного аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса типа «Монокль».

Обоснованность и достоверность полученных результатов основана на:

- корректном обосновании основных допущений и ограничений при постановке научной задачи, и корректном выборе исходных данных для моделей радиолокационных отражений от единичных гидрометеоров и ансамбля гидрометеоров сфероидной формы;

- совпадении экспериментальных данных и данных имитационного моделирования радиолокационных поляриметрических продуктов для S-диапазона частот;

- результатах имитационного моделирования радиолокационных поляриметрических продуктов для X-диапазона частот.

Соответствие паспорту специальности. Работа выполнена в соответствии с пунктами: Работа соответствует пунктам раздела «Области исследований» паспорта специальности 2.9.6 - «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»: 9 – «Аэронавигационное обеспечение полетов, закономерности процессов навигации, управление движением отдельных воздушных судов и их потоков», 10 - «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением», 16 - «Информационное обеспечение процессов аэронавигационного обеспечения полетов, контроля, испытаний, сертификации, использования по

назначению, технического обслуживания и ремонта, транспортирования, списания и утилизации авиационной техники».

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель радиолокационных отражений с полным поляризационным приемом от различных видов осадков, характерных для метеоявлений, вызывающих обледенение ВС;
2. Алгоритмы классификации зон вероятного обледенения ВС в районе аэродрома на основе методов нечеткой логики;
3. Рекомендации по реализации алгоритмов классификации зон вероятного обледенения в аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах Х-диапазона типа «Монокль».

Внедрение результатов работы. работы проводилась при выполнении НИР Учёного Совета МГТУ ГА и НИР и ОКР, выполняемых АО «Международные аэронавигационные системы» в рамках цикла научно-практических исследований по метеорологической радиолокации. Основные результаты диссертационной работы внедрены в АО «Международные аэронавигационные системы», Гидрометеорологическую службу Вооружённых Сил Российской Федерации, что подтверждено соответствующими актами. Полученные теоретические результаты приняты к использованию в учебном процессе в МГТУ ГА.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 6 научно-технических и научно-практических конференциях, а именно: на 3 всероссийских и 3 международных конференциях.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 11 печатных работах (76 страниц), в том числе: 3 научных статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ (27 страниц); 8 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях (49 страниц); 1 патент (9 страниц), 1 отчёт НИР Учёного совета МГТУ ГА (36 страниц).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, с выводами по каждому из них, заключения, библиографического списка и приложений с содержанием иллюстраций, таблиц и формул. Основная часть работы содержит 147 страниц, 42 рисунка и 20 таблиц. Общий объём работы с приложением составляет 232 страниц. Библиографический список литературы включает в себя 105 источников. Общий объём приложения 85 страниц, содержит 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области метеорологического обеспечения полетов гражданской авиации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, определены границы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ влияния метеообстановки и явления опасного обледенения воздушных судов на безопасность полётов в районе аэродрома, показано, как метеоусловия влияют на безопасность полётов. Приведен авиационных происшествий и катастроф по данным МАК и Авиаметтелеком Росгидромета за 2012-2022 годы, что демонстрирующий, что обледенение представляет особую опасность на этапах взлета и посадки ВС, т.е. в районе аэродрома.

Проведен анализ методов для прогнозирования зон вероятного обледенения воздушных судов, применяемых в гражданской авиации и показана необходимость разработки дополнительных средств для получения информации о фактической погоде в районе аэродрома. Существенно повысить уровень ситуационной осведомленности диспетчеров УВД и экипажей ВС о зонах вероятного обледенения в районе аэродрома можно с помощью аэродромных метеорологических радиолокационных комплексов (АРМЛК). Перспективные АРМЛК нового поколения должны строиться по схеме с

двойной поляризацией, что позволяет классифицировать фазовое состояние содержащихся в объёме пространства гидрометеоров, т.е. позволит расширить функциональные возможности радиолокатора, повысить достоверность и детальность классификации метеорологических объектов, а, следовательно, улучшить прогноз зон вероятного обледенения воздушных судов.

Рассмотрены пути расширения функциональных возможностей АМРЛК по прогнозированию и классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в районе аэродрома требует изменения в структуре обработки информации АМРЛК, а именно:

- поляризационной обработки радиолокационного сигнала и выделение поляриметрических продуктов
- оценки фазового состояния гидрометеоров радиолокационным методом в интересах обнаружения зон опасного обледенения;
- классификации зон вероятного обледенения воздушных судов радиолокационным методом на основе комплексного анализа поляриметрических и температурных характеристик атмосферы.

Во второй главе разработана функционально ориентированная модель формирования метеорологического продукта от гидрометеоров зон вероятного обледенения при полном поляризационном приеме. На базе имитационной модели построен имитационно-моделирующий комплекс (ИМК) поляриметрических продуктов АМРЛК. Основная задача разрабатываемой модели – формирование данных для обучения классификатора гидрометеоров для алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов. Аппроксимация частицы гидрометеора в форме сфероида является достаточно адекватной для всех типовых классов гидрометеоров переохлажденной жидкости, рассматриваемых в работе. Схема моделирования отражений ансамбля гидрометеоров сфероидной формы представлена на рис. 1.

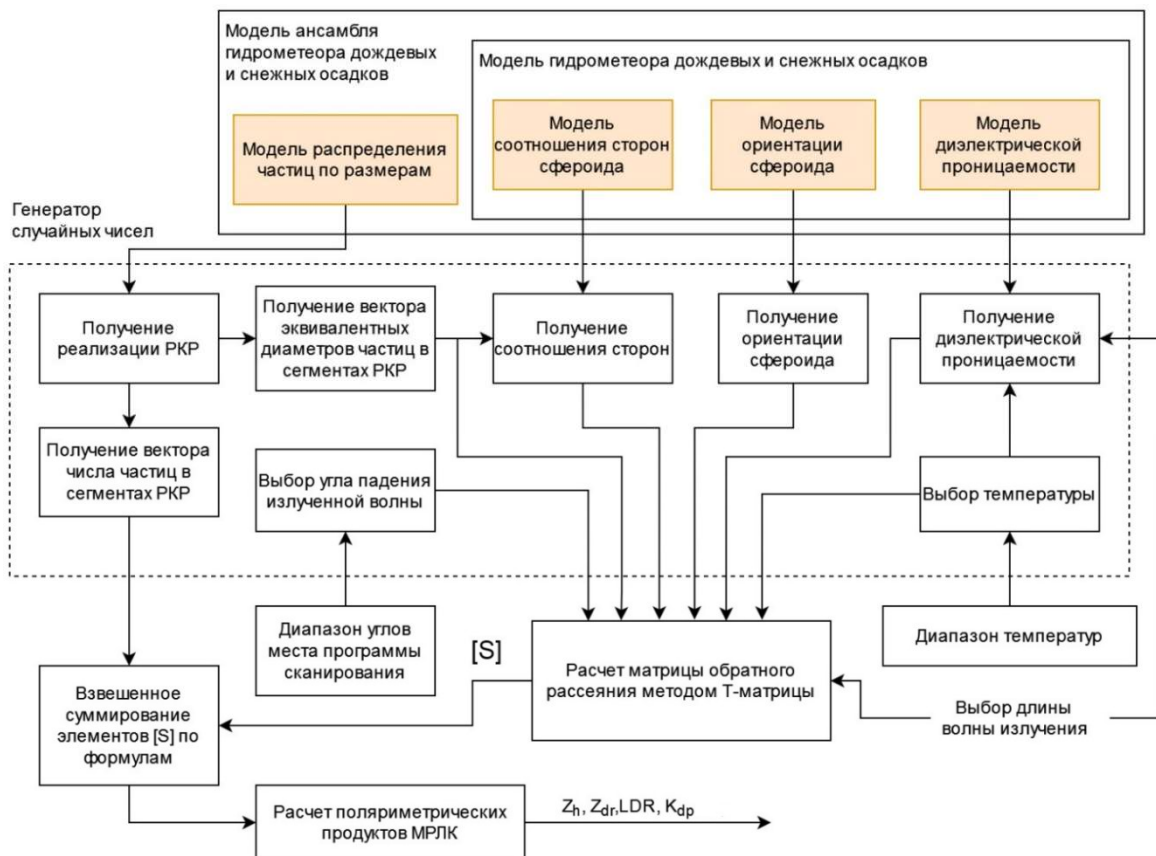


Рис.1 – Моделирование ансамбля гидрометеоров сфероидной формы

В зависимости от моделируемого класса гидрометеоров и параметров имитации, таких как температура и длина волны излучения, определяются возможные статистические, физические и диэлектрические параметры ансамбля. Далее, при помощи генератора случайных чисел, происходит выбор единичной реализации свойств ансамбля. После этого происходит итеративный выбор реализации свойств единичной частицы в ансамбле, расчет матрицы обратного рассеяния для этой частицы и усреднение результата по всему ансамблю. В качестве метода численного поиска матрицы $[S]$ используется метод Т-матрицы. После того, как все частицы в ансамбле были учтены, происходит расчет поляриметрических продуктов для текущей реализации ансамбля гидрометеоров моделируемого класса, таких как радиолокационная отражаемость Z_h , дифференциальная отражаемость Z_{dr} , удельная дифференциальная фаза K_{dp} и линейное деполяризационное отношение LDR . Базовые классы гидрометеоров для моделирования включают в себя сухой и мокрый снег, капли дождя и мороси, кристаллы льда.

Свойства модели ансамбля гидрометеоров задаются 4 частными моделями, выделенными блоками оранжевого цвета. Таким образом, для создания модели ансамбля конкретного класса гидрометеора требуется определить следующие модели физических, статистических и диэлектрических свойств гидрометеоров:

- модель распределения частиц по размерам внутри ансамбля;
- модель соотношения сторон единичного гидрометеора в ансамбле;
- модель ориентации единичного гидрометеора в ансамбле;
- модель диэлектрической проницаемости вещества гидрометеора в ансамбле.

Адекватность модели проверена методом сравнения получаемых поляриметрических продуктов с экспериментальными данными, полученными при помощи радара CSU-CHILL в 11 сантиметровом диапазоне длин волн. Для этого определены параметры классы мороси, дождя, ориентированных кристаллов льда, мокрого и сухого снега и произведено 1000 независимых сеансов моделирования для каждого из этих классов.

Анализ результатов показал высокую согласованность результатов моделирования и эксперимента для всех продуктов и классов. Вероятность правильного формирования поляриметрического продукта для любого из рассмотренных базовых классов по результатам моделирования была получена не ниже 0,9796. Проведена оценка адекватности моделирования полного набора продуктов МРЛК, включающего Z_h , Z_{dr} , K_{dp} и LDR для различных классов гидрометеоров. По результатам моделирования, вероятности корректного моделирования для классов мороси, дождя, ориентированных кристаллов льда, сухого и мокрого снега составляют 0,987, 0,967, 0,914, 0,951 и 0,929 соответственно.

В третьей главе разработаны алгоритмы классификации зон вероятного обледенения воздушных судов, сводящийся к обнаружению жидких капель переохлажденной воды.

Для этого разработан четко-логический классификатор гидрометеоров, специфичных явлению вероятного обледенения. В качестве входных параметров используются поляриметрические измерения Z_h , Z_{dr} , K_{dp} и LDR . Выходом системы классификации служит один из восьми классифицируемых типов гидрометеоров: морось (М), слабый дождь (СД), умеренный дождь (УД), ливневый дождь (ЛД), дождь «крупных капель» (КК), сухой снег (СС), сухие кристаллы льда различной ориентации (ОКЛ) и мокрый и тающий снег (МС). В качестве формы функций принадлежности (ФП) выбрана трапеция. Значение агрегации A_i класса i по выбранным входным параметрам рассчитывается как:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^4 W_{ij} P^{(i)}(V_j)}{\sum_{j=1}^4 W_{ij}} \quad (1)$$

где W_{ij} – вес поляриметрической величины j в классификации класса i , V_j – измерение поляриметрической величины j . Итоговая схема нечетко-логического классификатора показана на рис. 2.

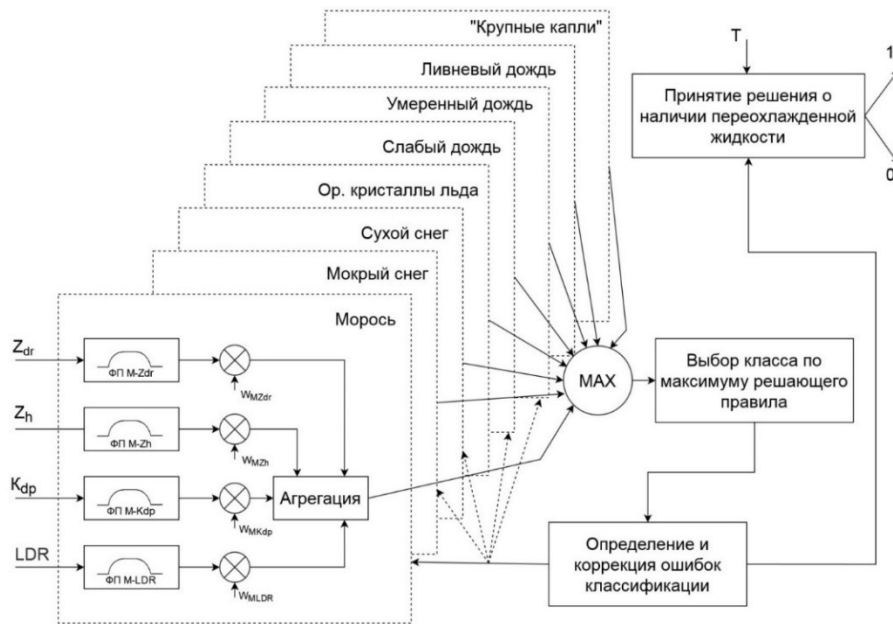


Рис.2 – Нейро-нечеткая логическая схема классификации гидрометеоров для классификатора опасности обледенения воздушных судов

Коэффициенты функций принадлежности и весовые конфиденты, полученные в ходе обучения алгоритма по данным имитационного моделирования показаны в табл. 1.

Табл. 1 – Параметры ФП алгоритма нечетко-логической классификации гидрометеоров

	М	СД	УД	ЛД	КК	СС	МС	ОКЛ
$P^{(i)}[Z_h(\text{дБZ})]$								
x1	–	5	34	36	25	-8	0	-50
x2	–	22	40	46	30	-1	12	-40
x3	20	30	46	–	47	20	30	15
x4	30	40	51	–	52	42	48	32
W	1	1	1	0,9	0,9	1	0,9	1
$P^{(i)}[Z_{dr}(\text{дБ})]$								
x1	-0,1	0	0,4	0,8	0,4	-0,2	1,5	-3,5
x2	-0,05	0,2	0,8	2	1,4	0	1,9	-3
x3	0,05	0,75	2	–	–	0,6	2,5	0,8
x4	1	0,85	2,3	–	–	0,8	3,1	3
W	0,9	1	1	1	1	0,8	0,9	1,1
$P^{(i)}[LDR(\text{дБ})]$								
x1	–	-57	-41	-36	-38	-75	-30	-34
x2	–	-45	-36	-26	-28	-60	-23	-18
x3	-60	-36	-28	-24	-25	-38	-20	-5
x4	-51	-28	-24	-23	-21	-33	-17	0

W	0,95	0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,9	0,9
$P^{(i)}[K_{dp}(\text{°})]$								
x1	-0,08	-0,1	1,4	1,4	-0,2	-0,2	-0,1	–
x2	-0,04	0,1	2,1	2,1	0,6	0	0	–
x3	0,02	1,8	25	44	4,8	0,2	0,05	0,1
x4	0,05	3,1	31	45,1	8,2	0,6	1,2	0,3
W	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9

На рисунке 3 представлена схема задачи формирования контуров зон вероятного обледенения ВС (КЗВО) для классификатора опасности обледенения воздушных судов.

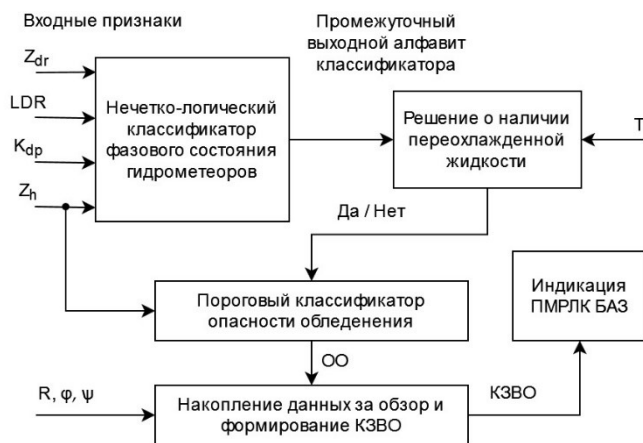


Рис.3 – Схема задачи формирования КЗВО в АМРЛК

На вход алгоритма подаются поляриметрические метеопродукты АМРЛК, которые используются в классификаторе фазового состояния гидрометеоров для проведения процедуры классификации. Выходом служит один из классов гидрометеоров, которые потенциально могут содержать переохлажденную жидкость, такие как мокрый снег или дождь, или классы кристаллизованной воды, не приводящие к явлению опасного обледенения ВС, такие как сухой снег.

По информации о классе гидрометеора и значению температуры на высоте радиолокационного измерения принимается решение о наличии и отсутствии переохлажденной жидкости в данной области пространства. Для классов без переохлажденной воды и при температуре до -15 °C , либо более 0 °C фиксируется отсутствие опасности обледенения ВС. В обратном случае, если в точке измерения обнаружены классы жидких гидрометеоров при температуре от -15 до -0 °C , производится пороговая классификация опасности обледенения по значению радиолокационной отражаемости. При превышении порога в 25 dBZ фиксируется высокая степень опасности обледенения ВС (ОО), 15 dBZ – умеренная опасность обледенения, а при 5 dBZ – низкая.

Качество классификации разработанного алгоритма проанализировано при помощи данных имитационного моделирования, полученных с использованием имитационно-моделирующего комплекса поляриметрических продуктов АМРЛК и произведено сравнение с результатами работы известного параметрического алгоритма.

Переход от параметрической к нечетко-логической схеме классификации повышает вероятность правильной классификации на величину около 30% и понижает вероятность пропуска явления обледенения ВС на 27%. При этом обнаружение опасной степени обледенения ВС происходит с вероятностью 98%.

В четвертой главе представлены псевдокоды алгоритмов классификации зон вероятного обледенения для использования в наземных АМРЛК.

Алгоритм оценки опасности обледенения $OO[m]$ в каналах дальности m организуется в виде цикла со счетчиком $m = \overline{0; M - 1}$. Внутри цикла последовательно выполняются следующие блоки:

[начало цикла по индексам m]

Происходит классификация фазового состояния гидрометеоров нечетко-логическим методом, результат записывается в вектор $OO[m]$:

$G \leftarrow [M, \text{СД}, \text{УД}, \text{ЛД}, \text{КК}, \text{МС}, \text{СС}, \text{ОКЛ}]; A^{max} \leftarrow 0; \mathbf{OO}[m] \leftarrow 0$
для $n = \overline{0; N-1}$

$$\left[\begin{array}{l} A^{accum} \leftarrow 0; W^{accum} \leftarrow 0; V \leftarrow [Z_h[m], Z_{dr}[m], K_{dp}[m], LDR[m]]; \\ \text{для } i = \overline{0; 3} \\ \quad \left[\begin{array}{l} A^{accum} \leftarrow A^{accum} + W[n, i] \cdot \mathbf{get_mf}(n, i, V[i]); \\ W^{accum} \leftarrow W^{accum} + W[n, j] \end{array} \right. \\ A^{accum} \leftarrow A^{accum} / W^{accum} \\ \text{если } A^{accum} > A^{max}, \text{ то } \left\{ \begin{array}{l} A^{max} \leftarrow A^{accum}; \\ \mathbf{OO}[m] \leftarrow G[n]; \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

Производится непосредственная классификация опасности обледенения

$G^{жф} \leftarrow [M, \text{СД}, \text{УД}, \text{ЛД}, \text{КК}, \text{МС}]$

если $\mathbf{OO}[m] \in G^{жф}$ и $h[m] \geq H_0^t$

$$\text{то } \left\{ \begin{array}{l} \text{если } Z_h[m] > 25 \text{ дБЗ, то } \mathbf{OO}[m] = \text{сильное;} \\ \text{иначе если } Z_h[m] > 15 \text{ дБЗ, то } \mathbf{OO}[m] = \text{умеренное;} \\ \text{иначе если } Z_h[m] > 15 \text{ дБЗ, то } \mathbf{OO}[m] = \text{слабое;} \\ \text{иначе } \mathbf{OO}[m] = \text{нет;} \end{array} \right.$$

[конец цикла по индексам k]

Расчёт значения функции принадлежности для класса n и для поляриметрической величины i со значением $V[i]$ производится с помощью функции $\mathbf{get_mf}(n, i, V[i])$:

если $V[i] < P[i, 0, n]$ или $V[i] > P[i, 3, n]$, то $\mathbf{get_mf} \leftarrow 0$;

$$\text{иначе если } V[i] \geq P[i, 0, n] \text{ и } V[i] < P[i, 1, n], \text{ то } \left\{ \begin{array}{l} a_1 \leftarrow P[i, 1, n] - P[i, 0, n] \\ a_0 \leftarrow V[i] - P[i, 0, n] \\ \mathbf{get_mf} \leftarrow a_0/a_1 \end{array} \right\}$$

$$\text{иначе если } V[i] > P[i, 2, n] \text{ или } V[i] \leq P[i, 3, n], \text{ то } \left\{ \begin{array}{l} a_1 \leftarrow P[i, 3, n] - P[i, 2, n] \\ a_0 \leftarrow P[i, 3, n] - V[i] \\ \mathbf{get_mf} \leftarrow a_0/a_1 \end{array} \right\}$$

иначе $\mathbf{get_mf} \leftarrow 1$;

Алгоритм оконтуривания зон вероятного обледенения для получения массива параметров контуров R_u ВС организуется в виде цикла со счетчиком $k = \overline{0; K-1}$ по индексам массива классов. Начальное количество контуров задается равным нулю $U \leftarrow 0$. Внутри цикла последовательно выполняются блоки:

[начало цикла по индексам k]

Для текущего класса C_k задается уровень $c \leftarrow C_k - 1$ и вспомогательное $\tilde{C} \leftarrow c - 1$. С целью замыкания контуров из матрицы данных A формируется окаймленная матрица B размером $M \times N = (I + 2) \times (J + 2)$. Для этого выполняется двойной цикл:

для $i = \overline{0; N-1}$ для $j = \overline{0; M-1}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } (i = 0) \vee (j = 0) \vee (i = N - 1) \vee (j = M - 1), \text{ то } B_{i,j} \leftarrow \tilde{C}, \\ \text{иначе } \left\{ \begin{array}{l} \text{если } A_{i-1,j-1} = C_k, \text{ то } B_{i,j} \leftarrow C_k, \text{ иначе } B_{i,j} \leftarrow \tilde{C}. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Формируются бинарные массивы H и V признаков пересечения ребер:

для $i = \overline{0; N-1}$ для $j = \overline{0; M-2}$

$$\text{если } [(B_{i,j} - c) \cdot (B_{i,j+1} - c) \leq 0] \wedge [(B_{i,j} = C_k) \vee (B_{i,j+1} = C_k)], \\ \text{то } H_{i,j} \leftarrow 1, \quad \text{иначе } H_{i,j} \leftarrow 0;$$

для $i = \overline{0; N-2}$ для $j = \overline{0; M-1}$

$$\text{если } [(B_{i+1,j} - c) \cdot (B_{i,j} - c) \leq 0] \wedge [(B_{i+1,j} = C_k) \vee (B_{i,j} = C_k)], \\ \text{то } V_{i,j} \leftarrow 1, \quad \text{иначе } V_{i,j} \leftarrow 0.$$

Выполняется построение замкнутых контуров. При этом осуществляется обход внутренних горизонтальных ребер и выполняются следующие операторы:

для $i = \overline{1; N-2}$ для $j = \overline{0; M-2}$

$$\left[\begin{array}{l}
f \leftarrow H_{i,j}; \\
\text{если } f = 1, \\
\text{то } \left\{ \begin{array}{l}
g \leftarrow 1; \alpha \leftarrow \begin{bmatrix} i \\ j \\ 0 \end{bmatrix}; \beta \leftarrow \begin{bmatrix} 0 \\ j \end{bmatrix}; \{x, z\} \leftarrow XZ(\alpha); R_{U,0} \leftarrow C_k; R_{U,2} \leftarrow 0; \\
\text{если } B_{i,j} < B_{i,j+1}, \quad \text{то } R_{U,1} \leftarrow 0, \quad \text{иначе } R_{U,1} \leftarrow 1; \\
R_{U,3} \leftarrow x \cdot \delta x; R_{U,4} \leftarrow z \cdot \delta z; r \leftarrow 1; r2 \leftarrow 2 \cdot r; H_{i,j} \leftarrow 0;
\end{array} \right\} \\
\text{пока } f = 1 \\
\left\{ \begin{array}{l}
\alpha \leftarrow \text{next}[\alpha, \text{start}(\alpha, \beta), \text{other}(\alpha)]; iH \leftarrow \alpha_0 + \alpha_2; jV \leftarrow \alpha_1 + \alpha_2 - 2; \\
\text{если } \alpha_2 < 2, \text{ то } \left\{ H_{iH, \alpha_1} \leftarrow 0; \beta' \leftarrow \begin{bmatrix} 0 \\ iH \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \right\}, \text{ иначе } \left\{ V_{\alpha_0, jV} \leftarrow 0; \beta' \leftarrow \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_0 \\ jV \end{bmatrix} \right\}; \\
\text{если } \beta = \beta', \text{ то } f \leftarrow 0, \\
\text{иначе } \left\{ \begin{array}{l}
\{x, z\} \leftarrow XZ(\alpha); \Delta x \leftarrow x - R_{U,1+r2}; \Delta z \leftarrow z - R_{U,2+r2}; \\
\text{если } (r > 1) \wedge (\Delta x = \Delta x') \wedge (\Delta z = \Delta z'), \\
\quad \text{то } \{R_{U,1+r2} \leftarrow x \cdot \delta x; R_{U,2+r2} \leftarrow z \cdot \delta z\}, \\
\quad \text{иначе } \{R_{U,3+r2} \leftarrow x \cdot \delta x; R_{U,4+r2} \leftarrow z \cdot \delta z\}; \\
r \leftarrow r + 1; r2 \leftarrow 2 \cdot r; \\
\Delta x' \leftarrow \Delta x; \Delta z' \leftarrow \Delta z;
\end{array} \right\} \\
\text{если } g = 1, \text{ то } \left\{ \begin{array}{l}
\text{если } \frac{R_{U,4} - R_{U,2+r2}}{R_{U,3} - R_{U,1+r2}} = \frac{R_{U,6} - R_{U,4}}{R_{U,5} - R_{U,3}}, \\
\quad \text{то } \{R_{U,3} \leftarrow R_{U,1+r2}; R_{U,4} \leftarrow R_{U,2+r2}; r \leftarrow r - 1\}; \\
R_{U,2} \leftarrow r; U \leftarrow U + 1; r \leftarrow 0; g \leftarrow 0.
\end{array} \right\}
\end{array} \right.
\end{array}$$

Относительные координаты $\{x, z\}$ точки пересечения с текущим ребром определяются с помощью функции $XZ(\alpha)$:

$$\begin{aligned}
m &\leftarrow \alpha_0 + \rho_{\alpha_2,3}; \quad n \leftarrow \alpha_1 + \rho_{\alpha_2,4}; \quad \mu \leftarrow \alpha_0 + \rho_{\alpha_2,5}; \quad v \leftarrow \alpha_1 + \rho_{\alpha_2,3}; \\
\Delta &\leftarrow \left| \frac{c - B_{m,n}}{B_{\mu,v} - B_{m,n}} \right|; \quad x \leftarrow m - 1 - (\rho_{\alpha_2,3} - \rho_{\alpha_2,5}) \cdot \Delta; \quad z \leftarrow n - 1 - (\rho_{\alpha_2,4} - \rho_{\alpha_2,3}) \cdot \Delta.
\end{aligned}$$

где ρ – вспомогательная матрица коэффициентов размера 5 на 5.

Переход в следующий квадрат производится при помощи функции $\text{next}[\alpha, \pi, \gamma]$:

$$\begin{array}{l}
\text{если } \pi < 2, \quad \text{то } k \leftarrow \rho_{\alpha_2, \pi}, \\
\text{иначе } \left\{ \begin{array}{l}
m \leftarrow 2 \cdot (1 - \gamma_0) - \gamma_1; \\
\text{если } m \geq 0, \text{ то } k \leftarrow \rho_{\alpha_2, m}, \\
\text{иначе } \left\{ \begin{array}{l}
\text{если } B_{\alpha_0 + \rho_{\alpha_2,3}, \alpha_1 + \rho_{\alpha_2,4}} < B_{\alpha_0 + \rho_{\alpha_2,5}, \alpha_1 + \rho_{\alpha_2,3'}}, \\
\quad \text{то } k \leftarrow \rho_{\alpha_2,0}, \text{ иначе } k \leftarrow \rho_{\alpha_2,1}
\end{array} \right\}
\end{array} \right\}
\end{array}$$

$$\text{next} \leftarrow [\alpha_0 + \tau_{k,1}, \alpha_1 + \tau_{k,2}, \tau_{k,0}].$$

где τ – вспомогательная матрица коэффициентов размера 4 на 3.

Признак начала контура в текущем квадрате определяется функцией $\text{start}(\alpha, \beta)$:

$$\text{start} \leftarrow 3; \quad k \leftarrow 0;$$

пока $(k < 3) \wedge (\text{start} = 3)$

$$\left[\begin{array}{l}
\mu \leftarrow \rho_{\alpha_2, k}; \\
\text{если } \mu < 2, \quad \text{то } \beta'_0 \leftarrow 0, \quad \text{иначе } \beta'_0 \leftarrow 1; \\
\text{если } \mu = 1, \quad \text{то } \beta'_1 \leftarrow \alpha_0 + 1, \quad \text{иначе } \beta'_0 \leftarrow \alpha_0; \\
\text{если } \mu = 3, \quad \text{то } \beta'_2 \leftarrow \alpha_1 + 1, \quad \text{иначе } \beta'_2 \leftarrow \alpha_1; \\
\text{если } \beta = \beta', \quad \text{то } \text{start} \leftarrow k; \\
k \leftarrow k + 1.
\end{array} \right.$$

Признаки пересечения не-текущих ребер формируются функцией $\text{other}(\alpha)$:
для $k = \overline{0; 2}$

$$\left[\begin{array}{l} \mu \leftarrow \rho_{\alpha_2, k}; \\ \text{если } \mu < 2, \quad \text{то } b \leftarrow 0, \quad \text{иначе } b \leftarrow 1; \\ \text{если } \mu = 1, \quad \text{то } i \leftarrow 1, \quad \text{иначе } i \leftarrow 0; \\ \text{если } \mu = 3, \quad \text{то } j \leftarrow 1, \quad \text{иначе } j \leftarrow 0; \\ \text{если } b = 0, \quad \text{то } \mathit{other}_k \leftarrow H_{\alpha_0+i, \alpha_1+j}, \quad \text{иначе } \mathit{other}_k \leftarrow V_{\alpha_0+i, \alpha_1+j}. \end{array} \right.$$

Полная карта метеорологических явлений МРЛК БАЗ «Монокль» в режиме «Обзор» с периодом обновления информации 10 минут представлена на рисунке 4 слева. Справа показан вариант индикации контуров зон вероятного обледенения на фоне карты опасных метеоявлений в режиме отображения опасных для авиации метеоявлений.

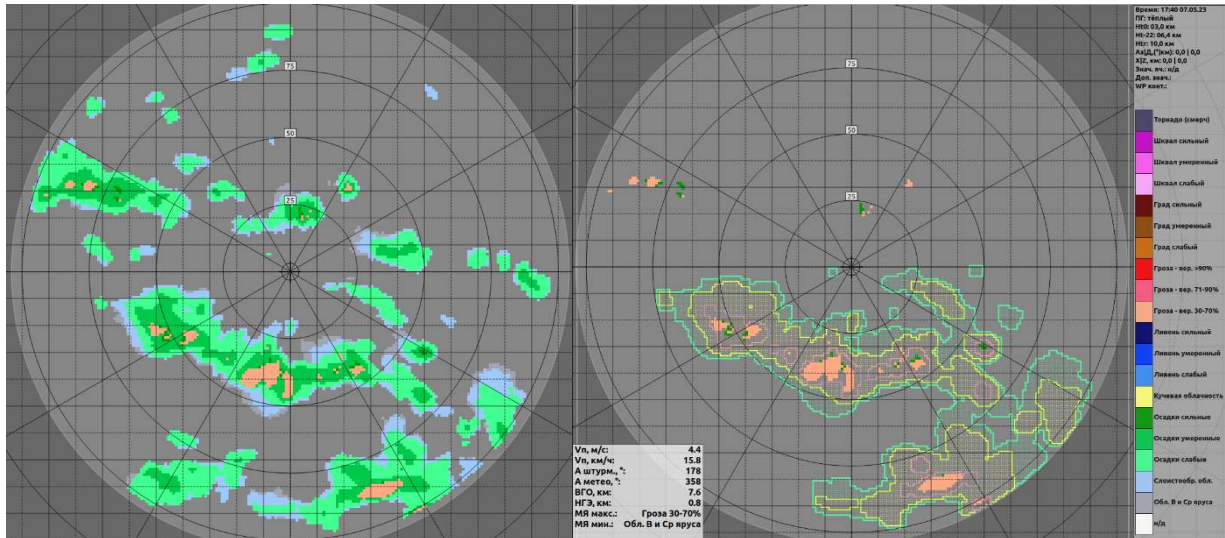


Рис.4 – Карта ОМЯ МРЛК БАЗ «Монокль» (слева), вариант индикации контуров зон вероятного обледенения ВС в перспективном АМРЛК на фоне карты ОМЯ (справа)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации, научно-технической задачи разработки моделей и алгоритмов классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в наземных метеорологических радиолокационных комплексах ближней аэродромной зоны.

В ходе исследований в работе были получены следующие основные результаты:

1. проведен анализ методов и технических средств обнаружения и классификации опасных метеоявлений в районе аэродрома;
2. разработана имитационная модель радиолокационных отражений от различных видов осадков, характерных для метеоявлений, вызывающих обледенение ВС;
3. разработан алгоритм оценки фазового состояния гидрометеоров радиолокационным методом в интересах обнаружения зон опасного обледенения;
4. разработан алгоритм классификации зон вероятного обледенения воздушных судов радиолокационным методом на основе комплексного анализа поляриметрических и температурных характеристик атмосферы для применения в наземных АМРЛК X-диапазона;
5. разработаны рекомендации по реализации алгоритмов классификации зон вероятного обледенения в АМРЛК X-диапазона типа «Монокль» в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.

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

1. Анализ существующих АМРЛК позволил установить, что они обладают большим модернизационным потенциалом. Значительного повышения информационных возможностей АМРЛК можно добиться за счет использования методов поляризационной обработки радиолокационных сигналов. Обработка сигнала, принятого на ортогональных поляризациях, позволяет получить информацию о форме, ориентации и физическом составе отражаемого метеоявления. Несмотря на то, что методология поляриметрической обработки радиосигнала в интересах метеорологии значительно проработана, алгоритмы классификации зон вероятного обледенения для АМРЛК X-диапазона в данный момент отсутствуют.

2. Показаны устойчивые зависимости между составом, размерами, формой и ориентацией гидрометеоров, содержащихся в метеоявлениях, вызывающих опасное обледенение ВС, и принятым радиосигналом, отраженным от этого метеоявления, на основе которых предложена модель отраженного сигнала от различных типов гидрометеоров и продемонстрирована её адекватность. На основе этих зависимостей в рамках данной модели разработан и реализован программный комплекс имитации поляриметрических продуктов АМРЛК, производящий моделирование радиолокационной отражаемости, дифференциальной отражаемости, удельной дифференциальной фазы и линейного деполяризационного отношения.

3. Разработаны алгоритмы классификации зон вероятного обледенения воздушных судов на базе нейро-нечеткого классификатора, отличительная особенность которого заключается в обнаружении классов гидрометеоров, потенциально содержащих переохлажденную жидкость, таких как морось, капли слабого, умеренного и ливневого дождя, «крупные капли» и мокрый снег при температуре от -15 C° до 0 C° . В качестве входных параметров классификатор фазового состояния использует четыре поляриметрических радиолокационных продукта: радиолокационную отражаемость, дифференциальную отражаемость, удельную дифференциальную фазу и линейное деполяризационное отношение. В качестве алфавита выходных классов сформирован набор из восьми гидрометеоров: морось, слабый дождь, умеренный дождь, ливневый дождь, дождь «больших капель», мокрый снег, сухой снег и ориентированные кристаллы льда. Обучение разработанного классификатора фазового состояния гидрометеоров было выполнено на основе анализа результатов имитационного моделирования поляриметрических продуктов, полученных при обработке радиолокационного сигнала.

4. Качество алгоритмов классификации зон вероятного обледенения воздушных судов было оценено при помощи данных имитационного моделирования и произведено сравнение с результатами работы параметрического алгоритма. Показано, что переход от параметрической к нечетко-логической схеме классификации повышает вероятность правильной классификации на величину около 30% и понижает вероятность пропуска явления обледенения ВС на 27%. При этом продемонстрировано, что обнаружение опасного обледенения ВС происходит с вероятностью 98%.

5. Разработаны практические рекомендации по реализации алгоритма в перспективном АМРЛК X-диапазона. Разработанный алгоритм классификации зон вероятного обледенения предлагается использовать в блоке вторичной обработки информации, где по данным первичных поляриметрических продуктов, профиля температуры и служебной информации от антенной системы производится формирование контуров зон вероятного обледенения.

6. Разработаны псевдокоды алгоритмов классификации зон вероятного обледенения, включающие в себя алгоритмы оценки опасности обледенения в точке радиолокационного измерения и оконтуривания зон вероятного обледенения ВС за полный обзор АМРЛК. Представлен вариант индикации контуров зон вероятного обледенения на фоне продукта «Карта опасных метеоявлений» для АМРЛК типа «Монокль».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Galaeva O.V., Zhabkin S.A. Analysis of the height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers. Civil Aviation High Technologies, vol. 23, no. 1, 2020, pp. 19 – 27;

2. Болелов Э.А., Васильев О.В., Зябкин С.А. Структура алгоритма обнаружения зон вероятного обледенения в аэродромных метеорологических радиолокационных станциях / Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 34, с. 146 – 157;

3. Васильев О.В., Зябкин С.А., Никоненко А.В., Чиров Д.С. Функционально-ориентированная модель формирования метеорологического продукта в X-диапазоне от гидрометеоров переохлажденной жидкости при полном поляризационном приеме / Цифровая обработка сигналов, 2023, №1, с. 57 – 64.

Публикации в других изданиях

4. Болелов Э.А., Зябкин С.А. Обоснование необходимости применения двойной поляризации в наземных метеорологической РЛС / Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития авиации», 22-23 мая 2019 года, г. Минск.

5. Васильев О.В., Зябкин С.А. Особенности обнаружения и классификации опасных метеорообъектов в метеорологических бортовых РЛС / Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции «Авионика», 12-13 марта 2020 года, г. Воронеж.

6. Зябкин С.А. Оценка фазового состояния гидрометеоров в аэродромной наземной метеорологической РЛС с двойной поляризацией / Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», – М.: ИД Академии Жуковского – стр. 291-293.

7. Зябкин С.А. Использование нечеткой логики для обнаружения зон вероятного обледенения в наземных метеорологических радиолокационных комплексах // Материалы XXIII конференции молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением», – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2021. – стр. 271-273.

8. Васильев О.В., Зябкин С.А., Лежанкин Б.В. Создание сценариев метеорологической обстановки для имитационного моделирования метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны / // сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации», Том 2, – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, – стр. 122-127.

9. Васильев О.В., Зябкин С.А., Каневский М.И. Моделирование сигнальной и помеховой обстановки при решении задач сертификации отечественных бортовых метеонавигационных РЛС / Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», – М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, – стр. 214.

10. Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Zhabkin S.A. et al. The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex «Monocle» / Proceedings of the 18th Technical Scientific Conference On Aviation Dedicated To The Memory of N.E. Zhukovsky, – Moscow, Russia, 2021 – pp. 64–72.

11. Vasiliev O.V., Zhabkin S.A., Peshko A.S. A Software Simulator of Signal and Interference Conditions for Aircraft Weather Radar Testing and Certification / Proceedings of the 19th Technical Scientific Conference On Aviation Dedicated To The Memory of N.E. Zhukovsky (14-15 April 2022) – Moscow, Russia, 2022 – pp. 79-84.

Соискатель:

