

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

На правах рукописи

БОЯРЕНКО ЭЛЬВИРА СЕРГЕЕВНА

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЕТОВ ПРИ НАЛИЧИИ
ОПАСНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЙ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОЙ ОБЛАЧНОСТИ В
РАЙОНЕ АЭРОДРОМА

Специальность: 2.9.6. – «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Галаева К. И.

Москва 2026

Содержание

	Стр.
Список условных обозначений и сокращений	5
Введение	7
1 Обоснование требований к повышению достоверности классификации опасных метеоявлений в интересах метеорологического обеспечения полетов	20
1.1 Обоснование современных требований к достоверности классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности для обеспечения безопасности полетов	20
1.1.1 Метеорологическое обеспечение безопасности полетов: влияние опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности на безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации.	20
1.1.2 Анализ опасных гидродинамических факторов, сопровождающих кучево – дождевую облачность	38
1.2 Обоснование приоритетных направлений повышения достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений.	58
1.2.1 Анализ критериев классификации, используемых в современных МРЛС	58
1.2.2 Обоснование приоритетных путей повышения достоверности	62
1.3 Постановка научной задачи	67
Выводы по главе 1	74
2 Обоснование исходных данных для классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности	78

2.1	Проведение экспериментального исследования по регистрации и анализу радиолокационных сигналов от опасных метеоявлений	78
2.1.1	Разработка методики экспериментального исследования формирования базы данных для классификации опасных метеоявлений	78
2.1.2	Предварительная обработка экспериментальных данных	84
2.2	Статистический анализ результатов экспериментальных исследований для обоснования исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень - гроза - град»	89
2.2.1	Разработка методики статистического анализа экспериментальных данных опасных метеорологических явлений «ливень-гроза-град»	89
2.2.2	Обоснование исходных данных для алгоритмов классификации	95
	Выводы по главе 2	97
3	Байесовский метод классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы	99
3.1	Разработка структуры метода классификации ОМЯ КДО	99
3.2	Разработка алгоритма классификации опасных метеоявлений на основе рабочего словаря признаков	102
3.2.1	Оценка информативности признаков классификации опасных метеоявлений	102
3.2.2	Алгоритм классификации ОМЯ КДО	112
	Выводы по главе 3	113
4	Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в АМРЛК	115

4.1	Предложение по корректировке алгоритмического обеспечения АМРЛК в интересах решения задачи классификации опасных метеоявлений	115
4.1.1	Разработка предложений по изменению критериев классификации ОМЯ КДО	115
4.1.2	Разработка предложений по изменению алгоритмического обеспечения АМРЛК при классификации ОМЯ КДО	119
4.2	Разработка практических рекомендаций по решению задачи классификации ОМЯ В АМРЛК с учетом пространственной вариативности и временной изменчивости	122
4.2.1	Географическая вариативность	123
4.2.2	Межгодовая изменчивость	138
	Выводы по главе 4	141
	Заключение	143
	Список используемых источников	150
	Приложение	163
	Приложение А. Сравнение критериев классификации, существующих метеорологических РЛС	164
	Приложение Б. Фрагменты баз данных экспериментального исследования, полученных при помощи АМРЛК	173
	Приложение В. Расчет вероятностей обнаружения	176

Список условных обозначений и сокращений

АМРЛК	–	аэродромный метеорологический радиолокационный комплекс
АМСГ	–	авиационная метеорологическая станция (гражданская)
АМЦ	–	авиационные метеорологические центры
АП	–	авиационные происшествия
БП	–	безопасность полетов
ВГО	–	верхняя граница облачности
ВОИ	–	вторичной обработки радиолокационной информации
ВПП	–	взлетно-посадочная полоса
ВС	–	воздушное судно
ВХА	–	ветровые характеристики атмосферы
ГА	–	гражданская авиация
ДМРЛ-С	–	доплеровский метеорологический радиолокатор
ЕТР	–	европейская территория России
ИАТА	–	международная ассоциация воздушного транспорта
ИВПП	–	искусственные взлетно-посадочные полосы
ИКАО	–	международная организация гражданской авиации
КДО	–	кучево-дождевая облачность
КТА	–	контрольная точка аэродрома
МАК	–	межгосударственный авиационный комитет
МО	–	математическое ожидание
МОП	–	метеорологическое обеспечение полетов
МС	–	метеостанция
НИР	–	научно-исследовательская работа
ОГ	–	оперативная группа

ОМЯ	–	опасные метеоявления
РД	–	рулежная дорожка
РЛС	–	радиолокационная станция
РО	–	радиолокационная отражаемость
РПО	–	радиопрозрачный обтекатель
СДТЭ	–	скорость диссипации турбулентной кинетической энергии
СКО	–	среднеквадратичное отклонение
СПО	–	специальное программное обеспечение
ТТХ	–	тактико-технические характеристики
УВД	–	управление воздушным движением
ФАП	–	федеральные авиационные правила
ЩАР	–	щелевая антенная решетка
ЭПР	–	эффективная площадь рассеивания
EDR	–	eddy dissipation rate (скорость диссипации энергии турбулентности)
METAR	–	meteorological aerodrome report (регулярная авиационная сводка погоды)
SPECI	–	aerodrome special meteorological report (специальная метеорологическая сводка)
VIL	–	vertically integrated liquid (вертикально интегрированной водности)

Введение

Актуальность темы исследования. В современной транспортной инфраструктуре гражданская авиация (далее — ГА) занимает центральное место, осуществляя внутренние и международные пассажирские и грузовые перевозки. Среди различных видов обеспечения безопасности полётов (далее — БП) в гражданской авиации важнейшим аспектом является метеорологическое обеспечение полетов (далее — МОП), которое регламентируется Федеральными авиационными правилами «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации», «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полётов воздушных судов». Основная задача МОП — предоставление актуальной и необходимой метеорологической информации всем пользователям воздушного пространства, включая экипаж воздушного судна и органы управления воздушным движением, для обеспечения регулярности, безопасности и эффективности выполнения полетов.

В настоящее время в современной ГА наблюдается тенденция к устойчивому росту объемов воздушных перевозок. В результате чего, требований к обеспечению БП постоянно растут. Поддержание необходимого уровня БП, определенного нормативными документами Международной организации гражданской авиации (далее — ИКАО), зависит от целого ряда факторов. Одним из критически важных аспектов является мониторинг метеорологической обстановки на протяжении всего полета воздушного судна (далее — ВС).

Согласно статистике ИКАО среди всех авиационных происшествий, произошедших за последние, приблизительно, два с половиной десятилетия примерно в каждом пятом событии (20%) ключевой причиной авиакатастроф являются неблагоприятные метеорологические условия. При этом почти в трети инцидентов (около 30%) плохие погодные условия играют роль сопутствующего или косвенного фактора, влияющего на возникновение и развитие авиационного

происшествия. При этом наибольшую опасность для авиации на маршруте полета представляют такие погодные условия, как интенсивные ливневые осадки, грозы, град и турбулентность, порождаемые конвективной облачностью.

Следовательно, первостепенной и ключевой задачей, решаемой аэродромными метеорологическими радиолокационными комплексами (далее — АМРЛК) является получение и предоставление достоверной классификации об опасных метеоявлениях (далее — ОМЯ), таких как ливневые осадки, грозы и град, возникающих в кучево-дождевых облаках (далее — КДО).

Существующие методы классификации данных метеоявлений разработаны Росгидрометом РФ и основаны на анализе распределения отражаемости метеообъектов по высотам с учетом градиента температур. Данные методы не учитывают ветровые характеристики (векторное поле скоростей, турбулентность), обладающие высокой информативностью в условиях конвективной облачности и доступностью для измерения современными метеорологическими РЛС типа АМРЛК «Монокль», которые выполняют следующие актуальные задачи:

1. Повышение уровня авиационной безопасности полетов посредством использования автоматизированного классификатора повышенной достоверности;
2. Повышение оправдываемости классификации опасных метеоявлений, связанных с конвективной облачностью.
3. Учет ветровых характеристик при распознавании опасных явлений в МетеоРЛС на алфавите «ливень - гроза - град».
4. Автоматизация процессов сбора и учета статистических данных при классификации опасных явлений в МетеоРЛС на алфавите «ливень - гроза - град».

Кроме того, в научном сообществе вопросы практического применения методов классификации опасных метеоявлений (ливней, гроз и града) с учетом влияния ветровых характеристик атмосферы (далее — ВХА), особенно турбулентности в кучево-дождевых облаках, остаются недостаточно изученными.

В связи с этим можно выделить следующие основные проблемы, препятствующие обеспечению безопасности и регулярности полетов, особенно в условиях конвективной облачности:

– некорректная информация, предоставляемая метеорологическими радиолокаторами, об оценках ливневых осадков, гроз и града в кучево-дождевой облачности;

– отсутствие разработанных методик учета ВХА при классификации ОМЯ КДО (ливней, гроз и града).

– недостаток программно-аппаратных средств для реализации автоматизированных алгоритмов классификации опасных метеоявлений с повышенной достоверностью.

Таким образом, проведенный анализ радиолокационных данных метеорологических наблюдений выявил **противоречие практического характера**: между обеспечением безопасности полетов по причинам, связанным с представлением достоверной метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и необходимостью повышения достоверности метеоинформации в метеосводках об опасных метеоявлениях в районе аэродрома с учетом наличия ограничений существующих технологий и методов мониторинга опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в современных метеорологических РЛС.

Наряду с этим существует острая необходимость повышения достоверности классификации ливней, гроз и града при использовании наземных метеолокаторов в условиях повышенной турбулентности внутри кучево-дождевой облачности. Следствием этого является **противоречие научного характера** между необходимостью достоверной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома и отсутствием соответствующего метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома.

В диссертации для разрешения указанных противоречий решается **актуальная научно-техническая задача** разработки метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе, с учетом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

Степень разработанности темы исследования

История применения радиолокационных технологий в метеорологии берет свое начало в 1941 году, когда американский ученый Дэвид Райд выдвинул новаторскую идею использовать радиолокаторы для мониторинга погодных условий [93]. Этот прорыв стал отправной точкой для дальнейшего развития технологий в этой области. Июль 1942 года ознаменовался важным шагом в развитии метеорологии: впервые радиолокационные данные, полученные в ходе метеорологических наблюдений с использованием радиолокационных станций, были интегрированы в метеорологические карты. Эти сведения были официально задокументированы и представлены в отчете, опубликованном в 1943 году [94]. В тот же период Центр авиационной метеорологии США начал активно сотрудничать с Массачусетским технологическим институтом, получая данные с его радиолокационной станции, что позволило значительно продвинуть радиолокационные методы изучения погоды.

Значительных успехов в развитии радиометеорологии добилась группа ученых, среди которых стоит выделить Дж. Райда, Д. Атласа, Х. Голдштейна, А. Сигерто, А. Бенга, Д. Керра, М. Лигда и Р. Векслера [93, 95-98]. Их работы были посвящены изучению различных аспектов взаимодействия радиоволн с атмосферой, таких как:

- Поглощение электромагнитных волн в атмосфере,
- Интенсивность радиоэха от облачных образований,
- Другие метеорологические явления.

Эти исследования заложили основу для дальнейшего прогресса в области радиолокационного мониторинга погоды.

В 1950-е годы были сделаны важные шаги для развития радиолокационной метеорологии в следующих направлениях:

- Изучение поляризации радиоволн, что позволило лучше понимать структуру атмосферных объектов [99];
- Улучшение точности измерения количества осадков с помощью радиолокационных данных;

– Исследование отражательной способности облаков и флуктуаций радиосигнала, что давало больше информации о динамике воздушных масс [100].

Одним из ключевых достижений стало освоение возможностей радиолокаторов для отслеживания таких опасных природных явлений, как торнадо. Это достижение открыло новый этап в прогнозировании и предупреждении стихийных бедствий.

В 1960-е годы основной акцент сместился на изучение отражающих свойств радиоэха грозовых облаков и града [93]. Ученые обратили особое внимание на обнаружение и исследование этих опасных метеорологических явлений. Одним из значимых результатов советских исследований стало появление методик радиолокационного обнаружения града. Кроме того, были организованы экспериментальные работы, нацеленные на защиту от града [101]. В результате, метеорологические радиолокаторы стали широко использоваться в повседневной работе советских метеорологов. Важный вклад в теоретическое обоснование этих процессов внесла публикация монографии Баттана по метеорадиолокации, вышедшая в этот период [102].

Следующим значительным этапом стало использование эффекта Доплера в радиолокационном мониторинге. С начала 1970-х годов эти методы позволили получать более точные данные о скорости движения воздушных масс и других параметрах атмосферы. Благодаря этому стало возможным создание детальных карт ветровых потоков и прочих характеристик воздушного пространства.

На сегодняшний день в большинстве развитых стран, включая Россию, активно внедряются современные доплеровские двухполяризационные метеорадиолокаторы. Эти устройства обладают высокой чувствительностью и позволяют компенсировать искажения радиосигналов, вызванные наличием гидрометеоров (капель воды, кристаллов льда), что делает измерения более точными. Кроме того, благодаря использованию двухполяризационных методов появилась возможность автоматической идентификации фазового состояния гидрометеоров, что улучшает качество анализа погодных условий [103].

Однако несмотря на очевидные преимущества новых технологий, Росгидромет продолжает эксплуатировать устаревшие радиолокаторы типа МРЛ-5, которые постепенно заменяются более современными моделями ДМРЛ-С, начиная с 2008 года. Замена старых устройств новыми связана с рядом сложностей: крупные размеры оборудования, высокие затраты на производство и эксплуатацию, а также трудности с настройкой и обслуживанием.

Критерии классификации метеоявлений, применяемых на современных метеостанциях, основываются на существующих нормативных документах. Тем не менее, эти критерии остаются несовершенными, поскольку каждый вид явления имеет свои специфические параметры, и они зачастую описываются интервалами значений, что создает сложности для однозначной интерпретации данных. Проблема достоверной идентификации таких опасных явлений погоды, как ливни, грозы и град стоит особенно остро. Недостаточная достоверность критериев существенно снижает эффективность работы системы предупреждения об этих явлениях.

Несмотря на весомые достижения в создании метеорологических радиолокационных комплексов, разработка метода и алгоритмов классификации опасных метеорологических явлений с учетом ветровых особенностей турбулентности остается нерешенной. Внедрение подобных инструментов способно значительно усилить ситуационную осведомленность экипажей ВС, диспетчеров УВД и аэродромных служб относительно текущих метеоусловий на маршруте полёта. Наряду с этим требуется законодательное закрепление методов и алгоритмов, обеспечивающих максимально достоверную классификацию ОМЯ, так как критерии классификации МЯ, применяемых на современных метеостанциях, опираются на устаревшие данные, указанные в нормативных документах 1993 г., что не позволяет адекватно оценивать риски, связанные с опасными метеоявлениями.

Целью работы является повышение достоверности метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и как следствие, повышение качества метеорологического обеспечения полётов в районе аэродрома путем

разработки метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» с учётом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

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

1. Анализ требований к достоверности метеоинформации.
2. Анализ метеоугроз, связанных с кучево-дождевой облачностью;
3. Анализ ветровых характеристик в интересах классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град»;
4. Разработка методики проведения экспериментального исследования по регистрации и анализу радиолокационных сигналов, отраженных от фактически наблюдавшихся опасных метеоявлений «ливень-гроза-град»;
5. Разработка метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности («ливень-гроза-град») с учетом отражательных характеристик и ВХА;
6. Разработка рекомендаций и основных положений концепции применения алгоритмов классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевыми облаками в АМРЛК в интересах метеорологического обеспечения полетов.

Объектом исследования является метеорологическое обеспечение полётов в районе аэродрома при возникновении опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью.

Предметом исследования являются метод и алгоритмы обработки метеоинформации, направленные на классификацию опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности, ориентированные на повышение достоверности классификации и снижение рисков для полетов воздушных судов.

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологические аспекты диссертационного исследования составляют фундаментальные научные работы зарубежных и отечественных учёных в области метеорологической радиолокации.

Для решения поставленных задач в работе применялись аналитические и экспериментальные методы исследований: методы теории вероятностей и математической статистики, методы статистических решений, методы теории метеорологической радиолокации.

Границы исследования: в работе предложены метод и алгоритмы оценивания опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» с учётом данных о ВХА: турбулентности. Исследование в диссертационной работе ограничивается оценкой опасных явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью и турбулентностью в ней, для АМРЛК.

Научная новизна работы состоит в развитии теоретических методов метеорологической радиолокации применительно к метеорологическому и аэронавигационному обеспечению полетов. В настоящей работе:

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по обнаружению опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома, позволяющая оценить отражательные и ветровые характеристики атмосферы на различных высотах для опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности, применительно к данным аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса.

2. Научно обоснован перечень параметров отражательных и ветровых характеристик в интересах повышения информативности и достоверности классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град», отличный от применяемых параметров при классификации опасных метеоявлений в современных метеорологических радиолокационных станциях и позволяющий повысить достоверность классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности.

3. Впервые разработан метод классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» при совместном использовании отражательных и ветровых характеристик атмосферы, отличающийся от применяемых в современных метеорологических радиолокационных станциях тем, что учитывает ветровые характеристики атмосферы.

4. Разработаны алгоритмы классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град», отличающиеся от используемых в современных метеорологических радиолокационных станциях тем, что сочетают в себе анализ радиолокационных данных об отражаемости и турбулентности с использованием методов машинного обучения для адаптивной настройки параметров классификации в зависимости от региональных климатических особенностей и текущей синоптической ситуации, что повышает достоверность обнаружения опасных явлений.

5. Разработаны рекомендации по практической реализации алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» с учетом отражательных и ветровых характеристик атмосферы в перспективных аэродромных метеорологических радиолокационных комплексах.

Практическая значимость результатов работы заключается в совершенствовании методов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности для модернизации систем радиолокационного мониторинга, что позволит повысить достоверность опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности и усовершенствовать нормативную базу метеорологического обеспечения полетов в районе аэродрома.

Самостоятельную практическую значимость имеют: методика проведения экспериментального исследования и статистический анализ результатов экспериментальных исследований для обоснования исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град»; метод и алгоритмы классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы; практические рекомендации по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе в интересах метеорологического обеспечения полётов.

Научная значимость работы определяется разработкой метода и алгоритмов оценки метеоявлений, позволяющих проводить исследования мощных кучево-дождевых облаков и сопутствующих опасных явлений погоды, что

позволит развить теоретические представления о процессах генезиса и развития кучево-дождевой облачности в районе аэродрома, разработать новые подходы к классификации кучево-дождевой облачности с учетом особенностей ее влияния на безопасность полетов в районе аэродрома.

Автором лично:

– разработана методика проведения экспериментальных исследований по сбору данных об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности;

– научно обоснован перечень параметров отражательных и ветровых характеристик в интересах повышения информативности и достоверности классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град»;

– разработаны метод и алгоритмы классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы;

– разработаны предложения по усовершенствованию алгоритмического обеспечения аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности;

– разработаны рекомендации по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе в интересах метеорологического обеспечения полетов.

Достоверность результатов основана на:

– корректном анализе реальных метеоугроз и средств метеообеспечения полетов на аэродромах различных категорий;

– сравнительном анализе статистически значимых данных аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса и априорно достоверных (эталонных) источников метеорологических данных;

– получении корректных статистически значимых результатов валидации метеорологических радиолокационных данных аэродромного радиолокационного комплекса;

– корректном использовании методов теории вероятностей и математической статистики, методов статистических решений, методов теории метеорологической радиолокации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения экспериментального исследования и статистический анализ результатов экспериментальных исследований для обоснования исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град».

2. Метод и алгоритмы классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

3. Практические рекомендации по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в АМРЛК в интересах метеорологического обеспечения полётов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы были представлены и обсуждены на 13 научно-практических и научно-технических конференциях, среди которых 5 всероссийских и 6 международных конференций.

Доклады, представленные на всероссийских научно-технических XIX, XX, XXI «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского», сделанные по теме диссертационной работы, были признаны лучшими и поощрены памятным дипломом.

В 2023 г. научно-исследовательская работа (НИР) по теме: «Обоснование приоритетных направлений оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений в наземных метеорологических РЛС», представленная на конкурсе НИР студентов и молодых ученых УЗ ГА, посвященной столетию со дня создания отечественной гражданской авиации, была признана одной из лучших работ и удостоена памятным дипломом.

Так же в 2023 г. НИР «Исследование отражательных и турбулентных характеристик атмосферы с использованием нового отечественного аэродромного

метеорологического радиолокационного комплекса «Монокль» в различных климатических зонах в интересах повышения достоверности автоматической классификации опасных метеоявлений» получила поддержку на соискание грантов в конкурсе 2022 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 21 печатной работе (214 страниц), в том числе: 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ по транспорту и 4 научных статьи в других рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ (93 страницы) [57, 75, 92, 104-108]; 12 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях (74 страницы) [110-121]; 1 отчёт НИР (53 страницы) [109].

Реализация результатов работы проводилась при выполнении НИР Учёного Совета МГТУ ГА, РФФИ и НИР, выполняемых АО «Бортовые аэронавигационные системы» в рамках цикла научно-практических исследований по метеорологической радиолокации. Основные результаты диссертационной работы внедрены в ООО «КОНТУР-НИИРС», в учебный процесс кафедры ТЭРЭО ВТ МГТУ ГА, что подтверждено соответствующими актами.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложений с содержанием иллюстраций, таблиц и формул. Основная часть работы содержит 149 страниц, 59 рисунков и 17 таблиц. Общий объём работы с приложением составляет 199 страниц. Библиографический список литературы включает в себя 121 источник. Общий объём приложения 36 страниц, содержит 3 приложения.

Автор выражает глубокую признательность, научному руководителю кандидату технических наук К. И. Галаевой, доктору технических наук, профессору О. В. Васильеву, коллективу кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта»

МГТУ ГА и сотрудникам АО «Бортовые аэронавигационные системы» за ценные замечания и предложения на всех этапах диссертационной работы.

Глава 1. Обоснование требований к повышению достоверности классификации опасных метеоявлений в интересах метеорологического обеспечения полетов

1.1. Обоснование современных требований к достоверности классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности для обеспечения безопасности полетов

1.1.1. Метеорологическое обеспечение безопасности полетов: влияние опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности на безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации.

Проблема обеспечения безопасности полётов остаётся одной из наиболее сложных и актуальных как в гражданской, так и в военной авиации, требующая совместного взаимодействия производителей авиационной техники и эксплуатантов. Этот параметр оказывает непосредственно влияние на качество функционирования авиационных служб.

Ключевые аспекты обеспечения безопасности полетов включают:

- аэронавигационное обслуживание - предоставление экипажам ВС всей необходимой аэронавигационной информации, организацию воздушного движения, а также обеспечение связи, навигации и наблюдения — всё это необходимо для обеспечения безопасного и упорядоченного воздушного движения;

- навигационное (штурманское) обеспечение полетов – предполагает предоставление экипажу средств и методов для определения местоположения воздушного судна, прокладки курса и контроля полета по маршруту следования;

- метеорологическое обеспечение полетов – предусматривает систематизированный сбор, обработку и предоставление информации экипажу ВС о текущих и прогнозируемых погодных условиях, которые могут повлиять на безопасность полетов;

- инженерно-авиационное обеспечение — представляет собой совокупность организационных и технических мероприятий, нацеленных на поддержание лётной годности воздушных судов, включая техническое обслуживание, ремонт и осмотр;

- аэродромное обеспечение - включает комплекс мер по поддержанию элементов аэродрома (ВПП, РД, перроны и места стоянки воздушных судов) в постоянной эксплуатационной готовности для выполнения взлета, посадки, руления и стоянки воздушных судов;

- авиатопливообеспечение - обеспечение безопасной и бесперебойной работы воздушных судов путем предоставления необходимого количества авиационного топлива и смазочных материалов высокого качества;

- светотехническое обеспечение - включает поддержание в исправном состоянии светосигнального оборудования аэродрома для обеспечения безопасной посадки и взлета в условиях ограниченной видимости и в ночное время;

- радиотехническое обеспечение - подразумевает содержание в исправном состоянии радиотехнических средств навигации и связи, используемых в организации воздушного движения;

- орнитологическое обеспечение и др.

В свою очередь существенное влияние на безопасность полетов оказывают следующие факторы:

- **Технический фактор**, включающий надежность самолётов и качество их обслуживания.

- **Человеческий фактор**, зависящий от действий экипажа, диспетчеров и техников.

- **Фактор окружающей среды**, определяемый погодными условиями и геофизической обстановкой.

Согласно данным Рисунка 1.1, подавляющее большинство авиационных происшествий (далее — АП) связано с ошибками пилотирования, составляющими внушительные 48,3%. Остальные причины распределяются следующим образом: человеческий фактор (17,6%), технические неисправности (17,1%), погодные условия (10,2%), коллизии (6%) и неизвестные факторы (0,8%).

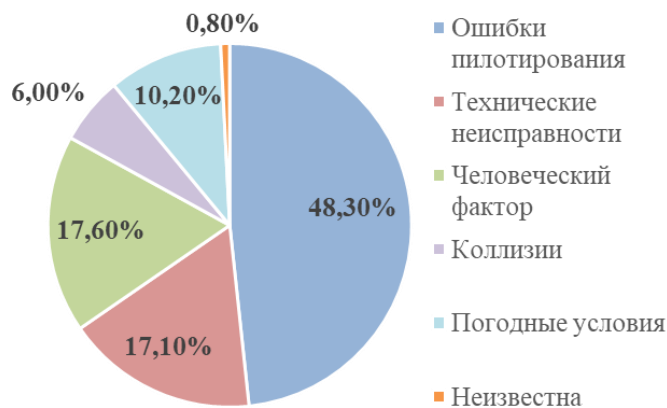


Рисунок 1.1 – Процентное распределение причин авиационных происшествий

Несмотря на относительно небольшую долю от общего числа всех АП, неблагоприятные метеоусловия часто становятся ключевыми или сопутствующим фактором различных авиационных событий. Некачественные метеопрогнозы приводят к примерно 10 % авиапроисшествий и около 9 % нарушений регулярности полетов [1].

В связи с тем, что неблагоприятные метеоусловия являются частой причиной в авиационных происшествиях, наличие и эффективное использование метеорологического оборудования на аэродроме критически важно для предотвращения происшествий и поддержания регулярности полетов. Минимальный набор метеорологического оборудования, необходимого на аэродроме, напрямую зависит от его класса. Принадлежность аэродрома к определенному классу определяется на основании двух решающих критериев: длины взлетно-посадочной полосы (далее — ВПП) и прочности ее покрытия.

Минимальный состав метеорологического оборудования для ВПП с точным заходом на посадку I категории и с заходом на посадку по приборам определяется таблицей 1. Для ВПП с точным заходом на посадку II и IIIA категорий требования к оборудованию указаны в таблице 2.

На аэродромах, имеющих две или более искусственные взлетно-посадочные полосы (далее — ИВПП), допускается использование общего комплекта оборудования, при условии соблюдения требований к его размещению относительно каждой ИВПП.

Также, в качестве рекомендуемого дополнения, в состав метеорологического оборудования аэродрома рекомендуется включить МРЛ.

Таблица 1 – Минимальный состав метеооборудования ВПП (направлений) точного захода на посадку I категории и захода на посадку по приборам

Метеооборудование	ВПП (направления) точного захода на посадку I категории	ВПП (направления) захода на посадку по приборам классов		
		А, Б, В	Г	Д, Е
1. Измерители-регистраторы видимости для одного и двух направлений взлета и посадки ВПП, комплект	3	3 ^{1,2}	2 ³	-
2. Щиты-ориентиры видимости, комплект: - для одного направления взлета и посадки ВПП - для двух направлений взлета и посадки ВПП	- -	- -	1 ⁴ 2 ⁴	1 ⁴ 1 ⁴
3. Измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости) для одного и двух направлений взлета и посадки ВПП, комплект	1	1	1	1
4. Дистанционные измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект: - для одного направления взлета и посадки ВПП - для двух направлений взлета и посадки ВПП	1 2	1 2	1 2	- ⁵ - ⁵
5. Измерители параметров ветра, комплект: - для одного направления взлета и посадки ВПП - для двух направлений взлета и посадки ВПП	1 ⁶ 2 ⁶	1 ⁶ 2 ⁶	1 ⁶ 2 ⁶	1 ⁶ 1 ⁶
6. Измерители атмосферного давления для аэродрома, шт.	1	1	1	1
7. Измерители температуры и влажности воздуха для аэродрома, комплект	1	1	1	1
8. Средства отображения метеоинформации (блоки индикации)	На аэродромах для ВПП (направлений) точного захода на посадку I категории и захода на посадку по приборам классов А, Б и В - на диспетчерских пунктах старта, посадки и круга, в рабочих помещениях синоптиков и метеонаблюдателей (контрольный). Для ВПП (направлений) захода на посадку по приборам классов Г, Д и Е оборудование является рекомендуемым.			
Примечание: 1. На ВПП класса В при фактической длине полосы 2000 м и менее допускается устанавливать 2 измерителя -регистратора видимости. 2. Допускается установка щитов -ориентиров видимости по одному комплекту на входе направление. 3. Рекомендуемое оборудование. 4. Могут не устанавливаться при наличии измерителей -регистраторов видимости.				

Таблица 2 – Минимальный состав метеоборудования ВПП (направлений)
точного захода на посадку II и IIIA категорий

Метеоборудование	Количество направлений взлета и посадки ВПП точного захода на посадку II и IIIA категорий	
	Одно	Два
1. Специализированные ЭВМ, обеспечивающие автоматические вычисления и выдачу на средства отображения и регистрации видимости, дальности видимости на ВПП, высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), параметров ветра, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, комплект	2, из них 1 резервный	2, из них 1 резервный
2. Первичные измерительные преобразователи видимости, комплект	3	3
3. Первичные измерительные преобразователи высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект	1	2
4. Измерители высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), комплект	1	1
5. Первичные измерительные преобразователи параметров ветра, комплект	1	2
6. Первичные измерительные преобразователи атмосферного давления, шт.	1	1
7. Первичные измерительные преобразователи температуры и влажности воздуха, комплект	1	1
8. Средства отображения метеоинформации (блоки индикации)	На аэродромах для ВПП (направлений) точного захода на посадку II, IIIA категории - на диспетчерских пунктах старта, посадки и круга, в рабочих помещениях синоптиков и метеонаблюдателей (контрольный).	
9. Средства регистрации выдаваемой метеоинформации, шт.	1 ¹	1 ¹
Примечание: ¹ Если в составе метеоборудования имеются персональные компьютеры, они могут использоваться в качестве средств регистрации выдаваемой метеоинформации.		

Типовая схема размещения метеоборудования для аэродромов класса Д (рисунок 1.2) не всегда обеспечивает необходимый уровень безопасности, особенно в районах с изменчивой погодой. Эффективным способом повышения качества метеорологического обеспечения является внедрение аэродромного метеорологического радиолокационного комплекса с низкими массогабаритными характеристиками.

СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ МЕТЕОБОРУДОВАНИЯ НА АЭРОДРОМАХ ГА КЛАССА Д

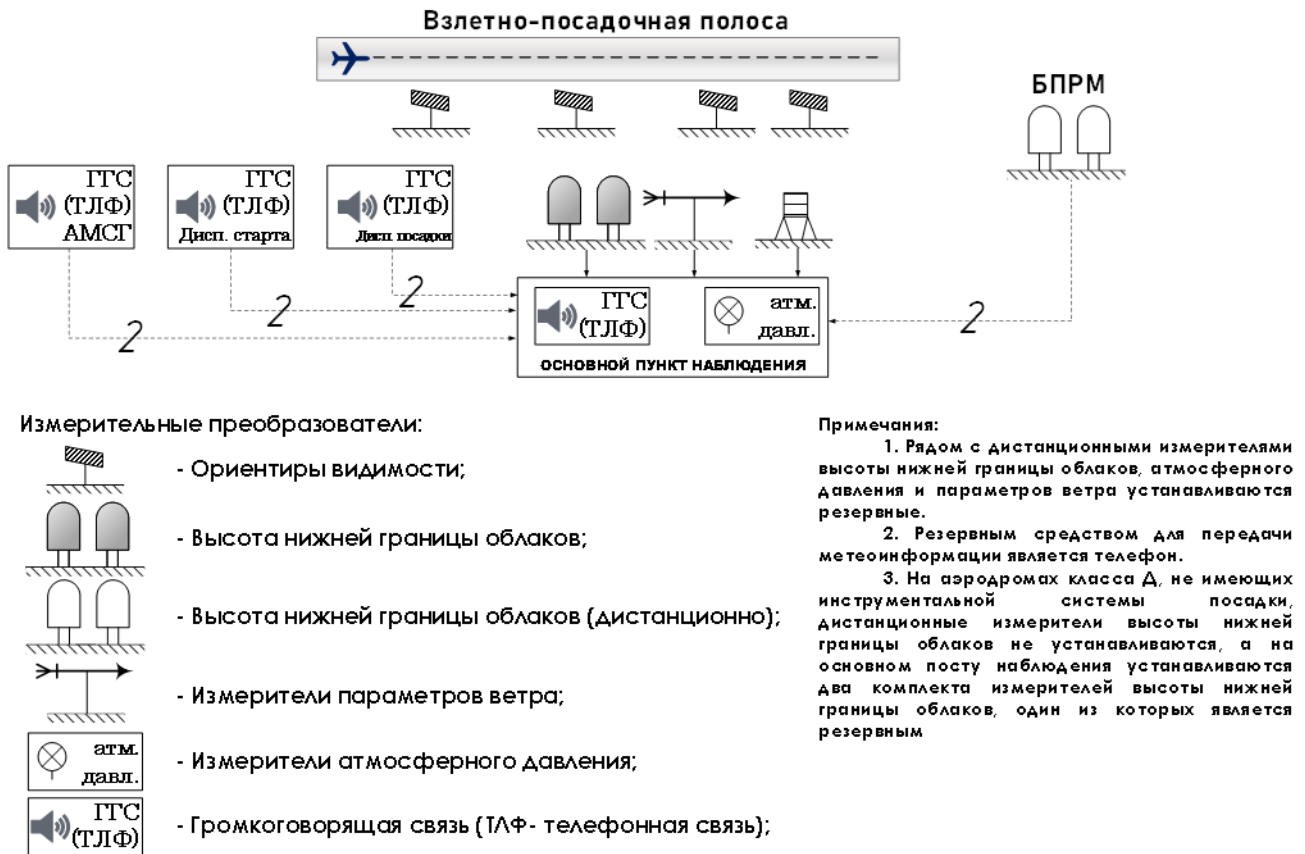


Рисунок 1.2 – Пример схемы размещения метеоборудования на аэродромах класса Д

ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» представляет собой комплексную организацию с территориально распределенной сетью подразделений, обеспечивающая метеорологическое обслуживание гражданской авиации в пределах единого воздушного пространства, чья деятельность направлена на удовлетворение потребностей пользователей воздушного пространства.

Фундаментом авиационной безопасности является точная и своевременная метеорологическая информация, за предоставление которой отвечает ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета». Организационная структура этого учреждения включает в себя головную организацию и 15 региональных филиалов, обеспечивающих координацию работы.

Основная задача по предоставлению метеорологических данных для авиации выполняется на местах специализированными аэродромными метеорологическими

органами. К ним относятся авиационные метеорологические центры (далее — АМЦ), авиационные метеорологические станции (далее — АМСГ) с синоптическими отделами или без них, а также оперативные группы (далее — ОГ), расположенные в аэропортах и на аэродромах по всей России. Центральным звеном является АМСГ, которая, в зависимости от своего разряда, передает экипажам, диспетчерам УВД и аэродромным службам актуальную метеоинформацию в соответствии с федеральными авиационными правилами. АМСГ IV разряда, не имеющие штатных синоптиков, получают прогнозы от закрепленных за ними АМЦ или АМСГ более высокого уровня.

Анализ системы МОП выявил ряд проблем в области нормативно-правового регулирования, организации и технического оснащения [1].

В нормативно-правовой области ключевой проблемой является предоставленная командиру воздушного судна возможность (согласно ФАП-128) самостоятельно определять источники метеорологической информации, не имея при этом четких критериев оценки их «достоверности», что создает предпосылки для субъективных решений и возможных ошибок.

Одним из ключевых недостатков в организации системы метеобеспечения является практика выдачи «перестраховочных прогнозов» со стороны синоптиков аэродромных метеослужб, зачастую не соответствующих реальной метеорологической обстановке. Такая практика объясняется высокой персональной (вплоть до уголовной) ответственностью синоптика за точность прогноза. Однако, это приводит к необоснованному перекладыванию ответственности на командира воздушного судна и, как следствие, к снижению регулярности полетов. Проблема "перестраховочных" прогнозов является системной для отечественной авиационной метеорологии.

Среди технических проблем метеорологического обеспечения полетов можно выделить:

- недостаточный уровень современной технической оснащенности аэродромных метеорологических служб, особенно на аэродромах региональных авиалиний и временных аэродромах;

- использование устаревших способов обмена информацией, что затрудняет оперативное получение данных различными потребителями;
- снижение численности персонала аэродромных метеослужб или ликвидации синоптических отделов;
- износ и моральное устаревание оборудования наблюдательной сети Росгидромета;
- недостаточное развитие сети современных метеорологических РЛС;
- уменьшение количества и износ действующих наземных метеорологических пунктов наблюдения.

Учитывая увеличение интенсивности авиаперевозок, совокупность перечисленных факторов порождает значительную обеспокоенность, поскольку это неизбежно влечет за собой ухудшение качества МОП и снижение достоверности метеорологических прогнозов.

Для обеспечения безопасности полетов, согласно Федеральным авиационным правилам (далее — ФАП), в метеосводки о фактической погоде на аэродроме (METAR, SPECI и аналогичных форматах) обязательно включается информация об ОМЯ, связанных с КДО, представляющих угрозу для ВС. Эти сводки, основанные на данных инструментальных наблюдений, предназначены для своевременного оповещения экипажей воздушных судов и диспетчеров УВД.

Метеосводки бывают двух типов: регулярные (METAR) для описания текущей погоды и специальные (SPECI) для информирования о резких изменениях. Процесс их формирования может быть автоматическим (автоматизированными метеорологическими станциями) или ручным (метеорологом-наблюдателем) с использованием данных от различных источников (метеорологические радиолокаторы, датчики на аэродроме, визуальные наблюдения).

В состав таких метеосводок входят данные о:

- 1) Типе идентифицируемых ОМЯ, таких как гроза, ливневый дождь, град, сильная турбулентность, обледенение и т.д.
- 2) Их интенсивности и степени опасности: например, умеренная гроза или сильный ливневый дождь.

3) Местоположения ОМЯ относительно аэродрома (например, в 10 км к северо-западу от аэродрома).

4) Направлении и скорости перемещения ОМЯ (если применимо).

5) Вертикальной протяженности облачности и высоте нижней границы облаков (если применимо).

6) Длине трассы опасной зоны (если применимо).

Структура метеосводок METAR и SPECI представлена на рисунке 1.3.

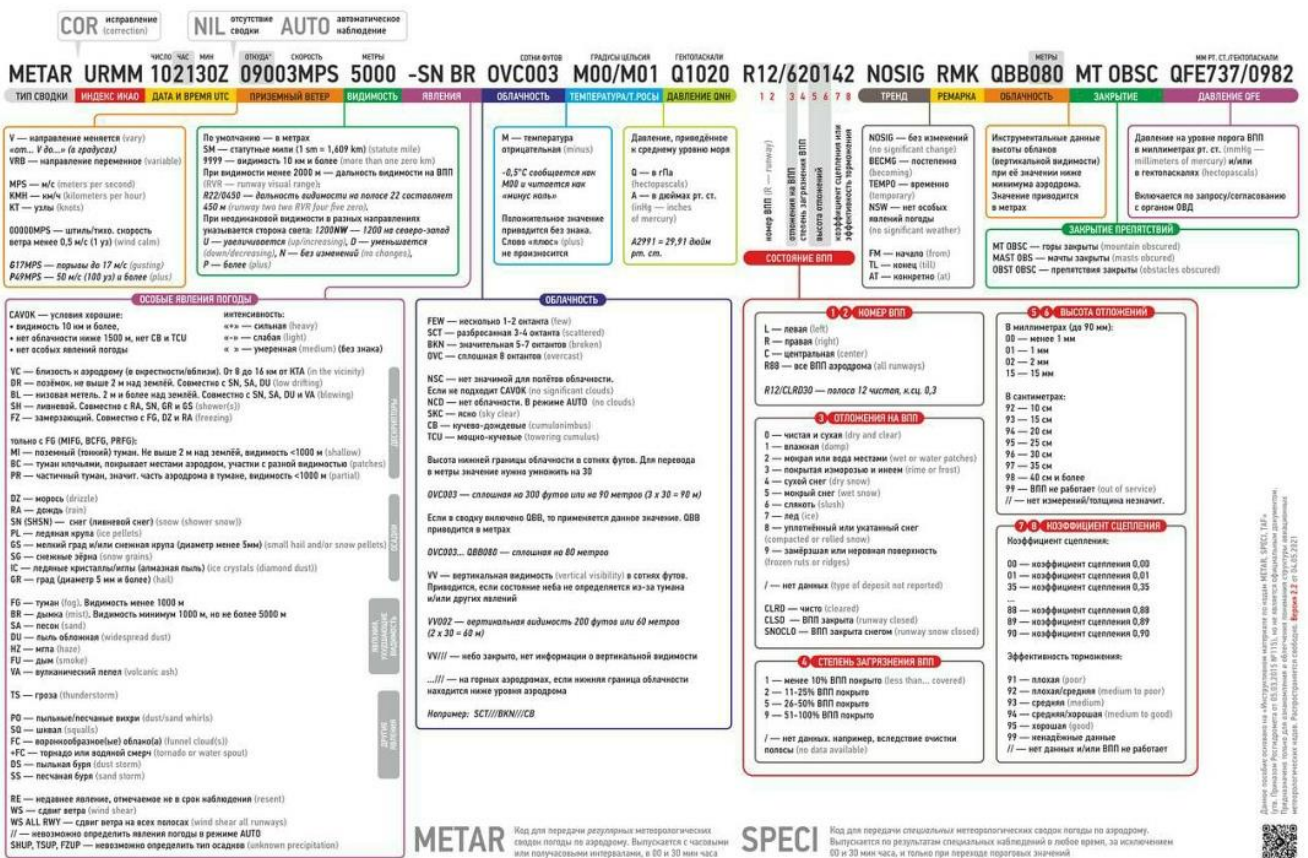


Рисунок 1.3 – Пример структуры формирования метеосводок METAR и SIGMET.

Следует отметить, что своевременное получение экипажами ВС и диспетчерами УВД данных метеосводок обеспечивается благодаря использованию современных систем связи и технологий отображения информации.

В истории авиации не раз случались трагедии, когда сбой в работе метеорологических радаров или некорректная информация от них становились

причиной авиакатастроф. Нередко информация об ОМЯ поступала к экипажам с задержкой. В подобных случаях, экипажи принимали решения на основе неполных или ошибочных данных о погодных условиях, что приводило к трагическим последствиям. Рассмотрим некоторые случаи авиапроисшествий, связанных с недостаточным метеорологическим обеспечением:

Катастрофа Ан-24РВ Кировоградской ШВЛП в Сухуми (1977 год): По имеющимся данным, метеорадиолокатор аэродрома не работал в момент происшествия. Отсутствие радиолокационного контроля за метеообстановкой привело к тому, что экипаж не имел полной информации об опасной кучево-дождевой облачности на траектории полета.

Катастрофа рейса US Airways 1016 DC-9 в Шарлотте (1994 год): Инцидент произошел во время прохождения грозового фронта с сильным ливнем и резкими изменениями ветра. Хотя метеорологическая информация была доступна, экипаж, вероятно, недооценил скорость развития и интенсивность опасных явлений (сдвиг ветра), что задержало решение об уходе на второй круг. Сам факт попадания в такие условия указывает на возможные просчеты в интерпретации и передаче метеоданных экипажу.

Катастрофа Ту-134 в Самаре (2007 год): Ключевым фактором стало то, что экипаж не был своевременно осведомлен о резком ухудшении видимости из-за тумана. Расследование выявило системные проблемы во взаимодействии между метеорологическими службами и службами управления воздушным движением, которые привели к критической задержке в передаче жизненно важной информации. Таким образом, экипаж был вынужден принимать решение о посадке, не обладая полной и актуальной картиной метеорологической обстановки.

Эти случаи демонстрируют, что недостаточное метеорологическое обеспечение, будь то неисправность оборудования, неверная интерпретация данных, или проблемы в коммуникации между службами, может иметь трагические последствия. Несмотря на достигнутый прогресс, задача обеспечения полной достоверности информации об ОМЯ в метеосводках остается нерешенной

и требует дальнейших усилий в области исследований, разработок и практического применения. Решение данной актуальной задачи представлено в настоящей работе.

Также многолетний опыт эксплуатации воздушных судов подтверждает существенное влияние метеорологических условий на безопасность полётов. Анализ статистических данных ИКАО за 30-летний период (1994–2024 гг.), показал, что "влияние неблагоприятных внешних условий" является причиной от 4% до 20% авиационных инцидентов, а в 30% случаев они выступают сопутствующими факторами [1]. Среди метеорологических причин наибольшую долю занимают: ухудшение видимости (62%), грозы (11%), турбулентность (11%), обледенение (7%) и прочие (9%).

Таким образом, сложные метеоусловия примерно в трети всех авиационных происшествий выступали фактором, способствующим неблагоприятному завершению полетов.

По данным другой организации, Международной ассоциации воздушного транспорта (ИАТА), этот показатель может достигать 40% [2]. Процентное распределение видов неблагоприятных метеоусловий, повлиявших на авиационные происшествия в гражданской авиации РФ за 2009–2016 гг., представлено на рисунке 1.4 [3].



Рисунок 1.4 – Статистическое распределение авиационных инцидентов в гражданской авиации РФ по группам причин, связанных с неблагоприятными внешними факторами, за 2009-2016 гг.

Анализ материалов, опубликованных в докладах Межгосударственного авиационного комитета (МАК) (по расследованиям авиапроисшествий в гражданской авиации СНГ) и Федеральным агентством воздушного транспорта (по вопросам безопасности полётов за 2012–2024 гг.) [4, 5], выявил следующую закономерность: из всей совокупности изученных авиационных событий 513 случаев напрямую связаны с неблагоприятными метеоусловиями или опасными метеоявлениями. Указанная статистика, приведённая в таблице 3, подчёркивает критическую значимость метеорологических факторов для обеспечения авиационной безопасности.

Таблица 3 – Количество авиационных происшествий в зависимости от типа неблагоприятного метеоявления, отмеченных в качестве причин АП за 2012–2024 гг.

Виды погодных условий	Количество АП и инцидентов												
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Турбулентность	3	-	-	1	-	3	5	-	-	-	-	-	-
Ливневые осадки	-	-	-	-	-	-	1	-	2	-	2	-	-
Грозовая деятельность	7	22	28	32	46	47	41	3	33	5	2	1	3
Град	-	3	-	-	1	2	-	-	2	-	-	-	-
Сильный порывистый ветер	26	7	13	6	4	6	1	-	3	-	-	-	-
Обледенение в облаках	2	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	-
Сдвиг ветра	-	-	-	10	1	8	1	1	2	5	2	1	-
Смерч	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Всего событий с ОМЯ	21	32	41	43	54	73	49	31	40	35	29	28	37

На основании отчетных материалов филиалов ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» и ФГБУ «УГМС» за 2019-2024 годы был проведен анализ авиационных инцидентов, обусловленных неблагоприятными метеоусловиями (Рисунок 1.5). В рамках данного анализа особое внимание было уделено

рассмотрению частоты возникновения и доли наличия таких метеоявлений, как ливни, грозы, град и шквалы, в общем массиве зарегистрированных происшествий.

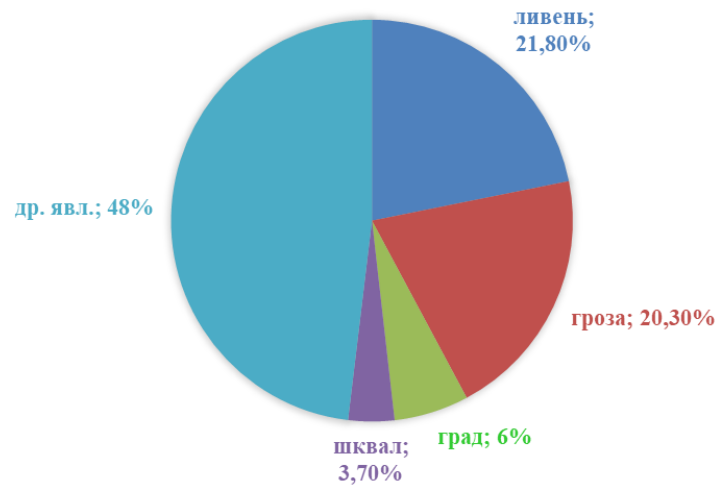


Рисунок 1.5 – Распределение авиационных событий по категориям ОМЯ за период 2019-2024 гг. (Источник данных: филиалы ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» и ФГБУ «УГМС»).

Согласно анализу статистических данных, грозовые явления выступают в качестве ключевого фактора, обуславливающего возникновение авиационных инцидентов, связанных с неблагоприятными метеоусловиями.

Статистически, на долю гроз приходится существенная часть – около 20,3% от общего числа зарегистрированных случаев. Это обусловлено комплексным воздействием грозы: сильные порывы ветра, интенсивные осадки (ливни), а также возможность образования кучево-дождевых облаков, представляющих опасность для воздушных судов.

Ливни, часто сопровождающие грозы, также являются существенным фактором риска. Они занимают второе место по частоте, составляя примерно 21,8% авиационных событий. Сильные ливни могут приводить к снижению видимости, ухудшению сцепления с поверхностью взлетно-посадочной полосы, а также к риску попадания воды в двигатели.

Хотя град встречается реже, чем ливни и грозы, он представляет собой серьезную угрозу для авиации. В среднем, на долю града приходится около 6% авиационных событий. Крупный град способен нанести значительные

повреждения конструкции самолета, включая лобовое стекло кабины пилотов, обшивку и лопасти двигателей.

Шквалы как фактор риска, характеризующиеся резкими и сильными порывами ветра, составляют оставшуюся часть авиационных событий, примерно 3,7%. Шквалы могут вызывать турбулентность, затруднять управление воздушным судном, особенно на этапах взлета и посадки, а также приводить к сносу самолета с курса.

Важно отметить, что эти метеорологические явления часто действуют в комплексе, усиливая риски для авиационной безопасности.

Полученные данные подчеркивают необходимость постоянного мониторинга метеорологической обстановки, совершенствования систем прогнозирования и своевременного информирования экипажей о потенциально опасных погодных условиях. Эффективное взаимодействие между авиационными службами и метеорологическими организациями, а также регулярное обучение пилотов действиям в условиях неблагоприятных метеоусловий, являются ключевыми факторами для минимизации рисков и обеспечения безопасности полетов.

Кучево-дождевая облачность представляет собой один из главных факторов, оказывающих значительное влияние на безопасность полетов. Этот тип облачности характеризуется мощным вертикальным развитием и может приводить к различным метеоявлениям, таким как ливни, грозы и град. Рассмотрим подробнее, как каждое из этих метеофакторов влияет на безопасность полетов.

В практике авиации были зафиксированы случаи, когда самолеты, попавшие в зону с интенсивными ливнями, приводил к резкому снижению высоты полета, вплоть до критического уровня. Кроме того, во время ливневых осадков резко уменьшается видимость полетов. Наряду с этим, ливневые осадки, попав в карбюратор поршневого двигателя, создают риск нарушения его работоспособности. Интенсивные осадки, особенно крупные капли, могут нарушить аэродинамику всасываемого воздушного потока, что, в свою очередь, приведет к снижению частоты вращения компрессора.

В сильный дождь показания указателя скорости могут быть заниженными, иногда до 100 км/ч, происходит это вследствие частичного блокирования каплями воды отверстия приемника воздушного давления. При выполнении высокоскоростного полёта в условиях интенсивного ливневого дождя возможно возникновение явления скалывания лакокрасочного покрытия [6]. Кроме того, в случае сильного ливня негерметизированные лёгкие воздушные суда подвержены проникновению (засасыванию) воды в кабину или двигательный отсек, что создаёт потенциальную угрозу для бортового электронного оборудования [7].



Рисунок 1.6 – Последствия попадания самолета в ливневые осадки.

Гроза является опасной для летящего самолета из-за возможности электрического разряда через самолет, что может привести к гибели экипажа. Кроме того, внутри кучево-дождевого облака имеют место сильные вихревые движения, попав в которые самолет может потерять управление и разрушиться. Опасно также летать вблизи грозового облака. Полеты в условиях грозовой активности сопряжены с повышенными рисками для воздушных судов. Радиосвязь может быть нарушена из-за сильных радиопомех. Кроме того, вся область грозового облака характеризуется наличием повышенной турбулентности. Самое простое, что бывает в полете при конвективной турбулентности – болтанка. При возрастании интенсивности турбулентности увеличивается и ее воздействие. В зависимости от типа воздушного судна, турбулентность высокой интенсивности способна нанести конструктивные повреждения ВС [7]. Кроме того, грозы

сопровожаются мощными электрическими разрядами – молниями, которые представляют серьезную угрозу для самолета [8]. Электротермическое воздействие молний на металлические части конструкции приводит к видимым повреждениям (проплавление, прожоги, эрозию в зоне воздействия разряда, и т.п.) Главная опасность заключается в потенциальном взрыве паров топлива при попадании молнии в топливный бак. Среди наиболее серьезных последствий поражения молнией для воздушных судов – нарушение работы двигателей, вплоть до их полного отказа. По статистике, до 6% случаев поражения молнией приводят к нарушению газодинамической устойчивости двигателей, причем большинство таких инцидентов (11 из 12) связаны с хвостовыми двигателями. В четверти этих случаев возникает крайне опасное явление – помпаж [9]. Также удар молниевым разрядом по самолету может вызвать перенапряжение в бортовой электронике и вычислительных системах, что чревато их преждевременным отключением или отказом, делая управление самолетом невозможным.



Рисунок 1.7 – Самолет после попадания в грозовую облачность

Полет в зоне града является крайне нежелательным и опасным. Град маленького размера оказывает небольшое влияние на самолет, он просто отскакивает от него. Но даже маленькие градины ухудшают видимость [7]. Крупный град, ударяясь о корпус самолета, способен нанести серьезный ущерб, варьирующийся от деформации обшивки до потери герметичности, как в кабине пилотов, так и в пассажирском отсеке. Град может сильно повредить лопасти

пропеллера и лопасти турбины. Он может блокировать воздухозаборники или откладываться где-нибудь внутри воздухозаборника [3].

Вероятность попадания самолета в град ночью, когда видимость почти отсутствует, снижена в связи с тем, что только 24% случаев грозы с градом приходится на ночное время. Выпадение града происходит обычно днем.

При полете в зоне отдельной грозы можно и не встретиться с градом, но на него можно натолкнуться на другой высоте в этой же грозовой зоне.

Случаи разрушения самолетов в результате попадания в зону выпадения градовых осадков встречаются крайне редко, тем не менее, град представляет собой одно из наиболее опасных для самолета явлений во время совершения полета в условиях в грозовой активности.

Практические наблюдения показывают, что градины диаметром менее двух сантиметров производят в худшем случае незначительные повреждения обшивки самолета, а градины диаметром около пяти сантиметров могут причинить самолету серьезные повреждения [10,11].

Общеизвестно, что обшивка ВС изготавливается из алюминиевых сплавов и композитных материалов, которые обладают относительно низкой прочностью. В связи с этим, столкновение с градом на высокой скорости неизбежно приведет к повреждению обшивки. Град также способен повредить стекло кабины пилота, но вероятность его полного разрушения не превышает 5%.

При попадании крупного града в двигатель будет нарушена его работа, вследствие чего может произойти пожар двигателя, следовательно, задымление салона, а также возможен и отказ двигателя.

Если град очень сильный и самолёт идёт на посадку, есть вероятность повреждения стойки шасси, а также фар и световых огней. Крупный град может повредить элементы управления воздушным судном – элероны и закрылки [12].



Рисунок 1.8 – Самолет, поврежденный градом

Наряду с опасными метеоявлениями, непосредственно рассматриваемыми в настоящей работе (ливни, грозы, град), значительную угрозу для авиации представляют крупномасштабные атмосферные явления, такие как тропические циклоны, ураганы, штормы и смерчи. Однако, в силу низкой частоты встречаемости данных явлений в умеренных широтах, их учет в разработанной системе классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности не представляется целесообразным и выходит за рамки настоящего исследования.

Из приведенного выше материала, можно отметить, что наибольший интерес представляет классификация ливневых осадков, грозовой деятельности и града в кучево-дождевой облачности, сопровождаемой турбулентностью, которые часто встречаются на территории РФ и несут серьезную опасность для авиации. Данные метеоявления были выбраны в качестве алфавита классов.

Вывод:

Одним из наиболее важных факторов, влияющим на безопасность полетов, является метеорологическая обстановка. Наиболее опасны и часто встречаются на территории РФ такие метеорологические явления, как ливень, гроза и град. Указанные метеоявления возникают вследствие развития кучево-дождевой облачности и характеризуются наличием значительной степени турбулентности. Поэтому, на каждом этапе полета ВС – от взлета и следования по маршруту до

захода на посадку и снижения, экипаж воздушного судна должен быть заблаговременно проинформирован о наличии опасных метеорологических явлений.

1.1.2. Анализ опасных гидродинамических факторов, сопровождающих кучево – дождевую облачность

Возникновение ОМЯ КДО (ливневые осадки, грозы и град) напрямую связано с конвективными процессами в атмосфере. Данные явления наблюдаются преимущественно в кучево-дождевых (Cb) и мощных кучево-дождевых (Tcu) облаках, где одновременно отмечается усилением турбулентности, что существенно повышает риски при выполнении полетов ВС.

Кучево-дождевые облака (грозовые) представляют собой сложную мощную гидродинамическую систему, состоящую из паровоздушной массы, содержащие жидкую и твердую воду [17]. Они являются источником опасных явлений, таких как грозы, град, сильные восходящие и нисходящие потоки воздуха, сдвиг ветра и турбулентность. Вблизи таких облаков, в нижних слоях атмосферы, возникают зоны резких изменений ветра, известные как шквалы или фронты порывистости. [18].

Характерной особенностью КДО является наличие конвективных ячеек — от одной до 5–8 единиц. Горизонтальные размеры этих ячеек лежат в пределах от 1–1,5 до 8–10 км. Ячейки могут быть распределены случайным образом либо выстраиваться в линию, наклонённую относительно вектора движения облака [19]. Типовая структура таких облаков представлена на рисунке ниже:

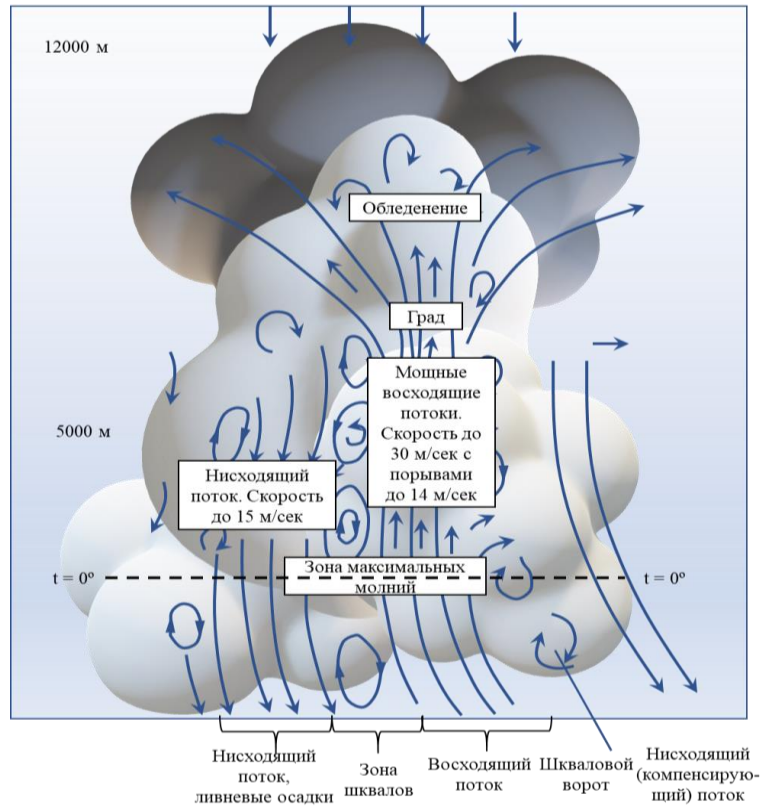


Рисунок 1.9 – Типовая структура кучево-дождевого облака в максимальной стадии развития

Грозовые облака в своем развитии проходят три стадии: 1) начального развития; 2) максимального развития (стадия зрелости); 3) разрушения (стадия диссипации).

Первая стадия (Рисунок 1.10) наблюдается от момента возникновения облака до выпадения осадков. В этой стадии облака имеет вид кучевых (Cu) и мощнокучевых (Cusong.), состоят из водяных капель и не дают осадков. Внутри облаков преобладают восходящие потоки, а нисходящие потоки наблюдаются между облаками.



Рисунок 1.10 – Начальная стадия развития грозового облака

Наибольшую опасность представляет вторая фаза развития грозового облака (Рисунок 1.11), которая начинается с момента появления первых ливневых осадков и образования кристаллов льда в верхней части мощного кучевого облака. В этот момент облако переходит в состояние кучево-дождевого (Cb). Верхняя область облака, располагаясь в зоне низких отрицательных температур, имеет ледяную структуру. Нижняя область, чаще всего находящаяся в зоне положительных температур, состоит преимущественно из водяных капель. Промежуточная часть (между изотермами 0°C и -20°C) представляет собой смесь обеих структур. Внутри облака возможно образование града, снега и крупных дождевых капель, которые затем выпадают в виде ливней.



Рисунок 1.11 – Стадия зрелости грозового облака

Завершающая стадия (Рисунок 1.12) существования кучево-дождевого облака начинается с момента распада грозового облака. На этой стадии дождевые осадки распространяются по значительной части нижней половины облака. Как правило, процесс разрушения облачной массы инициируется снизу. Процесс деградации облаков, как правило, начинается с их нижних слоев. Характерным симптомом начала распада служит изменение очертаний нижней границы: она принимает вымеобразную, провисающую форму [8].



Рисунок 1.12 – Стадия распада грозового облака

Рассмотрим более подробно характерные гидродинамические факторы, сопровождающие исследуемые метеоявления.

1) Скорость движения воздуха (скорость ветра)

Ливневые осадки формируются в конвективных облаках или при усилении конвективных процессов в сплошной фронтальной облачности. Они отмечаются резкими колебаниями интенсивности и, как правило, происходят в течение непродолжительных промежутков времени. В области ливневых осадков наблюдается нисходящий воздушный поток со скоростью 10–15 м/с, который дополнительно усиливается за счёт самого ливня [20].

Гроза есть результат неустойчивой атмосферы, характеризующейся усиленным образованием облаков, которые сопровождаются громом и разрядами молний. Чаще всего грозовые явления отмечаются в теплое время года. В общем случае для зарождения грозового облака атмосфера должна быть неустойчивой, тогда гроза образуется в месте стыка холодных и тёплых воздушных масс, в зоне тёплого, холодного атмосферного фронтов, а также фронта окклюзии. Эмпирические наблюдения за грозовыми явлениями демонстрируют реализацию непрерывного турбулентного энергетического каскада в соответствии с теорией Колмогорова. Количественный анализ динамики воздушных потоков выявляет следующие показатели: максимальная скорость восходящих потоков достигает диапазона 50–60 м/с; скорость нисходящих потоков составляет 30–35 м/с [21].

Градовые облака – это наиболее мощные кучево-дождевые образования, характеризующиеся тем, что ледяные частицы достигают земной поверхности в виде града. Град как правило выпадает в тёплый период года внутри мощных кучево-дождевых облаков в форме плотных ледяных частиц разного размера, иногда весьма крупных. Ключевым фактором для его формирования является высокая влажность в облаке и наличие сильных восходящих потоков воздуха. Эти потоки способствуют росту облака до 8-10 км и более, а также увеличению размеров ледяных частиц [22]. Турбулентность воздушных потоков особенно высока на границе раздела восходящих и нисходящих потоков в градовом облаке, где происходит формирование крупных капель и капельных зародышей града; скорость этих потоков может превышать 30 м/с [23]. Важно отметить, что выпадение града происходит не в центральной части восходящего потока, а на его периферии, и практически всегда сопровождается грозой. Согласно анализу статистических данных, нисходящие токи полностью отсутствовали в градовых ячейках на уровне 6000 м, редко встречались на уровне 4500 м; ниже уровня изотермы 0°C (3000 м) восходящие и нисходящие токи встречались примерно с одинаковой частотой, а на нижней границе наблюдались только нисходящие токи. Ширина спектра вертикальных скоростей движения воздуха и гидрометеоров в кучево-дождевых облаках без грозовых разрядов гораздо уже. Распределения значений средних скоростей вертикального воздушного потока ω , средняя доплеровская скорость частиц v и отражающей способности η (Удельная площадь обратного рассеяния облаков и осадков или удельная ЭПР) по высоте в грозо-градовом облаке при прохождении грозового облака с осадками в виде града представлены на рисунке 1.13.

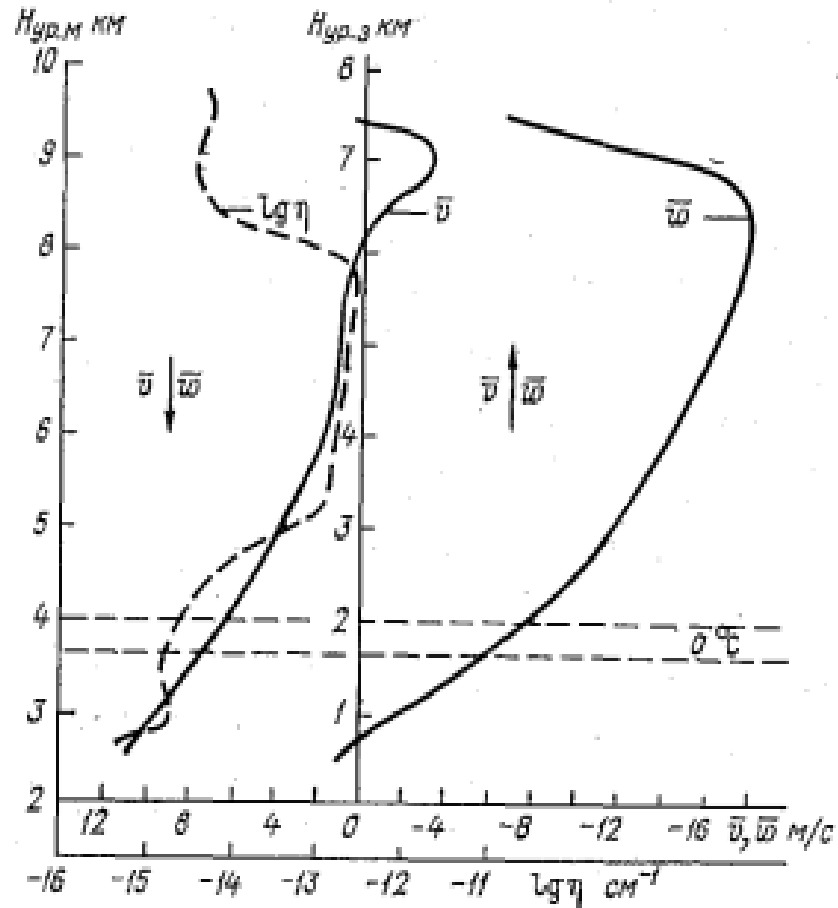


Рисунок 1.13 – Распределение средних значений $\bar{\omega}$, \bar{v} и $\lg \eta$ по высоте в грозо-градовом облаке.

Из анализа кривых на этом рисунке следует, что в среднем в указанных облаках, за исключением высот ниже 2,5 км, наблюдаются восходящие вертикальные движения воздуха. При этом ω плавно возрастает в предвершинной части облака, достигая максимального значения на высоте около 9 км над уровнем моря.

Вертикальные скорости падения гидрометеоров являются их ключевой особенностью. Максимальные значения скорости (v) фиксируются непосредственно у земной поверхности, и постепенно уменьшаются с высотой, достигая нуля на отметках 7–8 км. Выше 8 км мелкие частицы увлекаются восходящими потоками воздуха (скорость ~ 3 м/с), в то время как сами восходящие потоки (ω) достигают пиковых значений 18–20 м/с [24].

Медианные значения скорости вертикальных движений w внутри грозовых и градовых кучево-дождевых облаков на 2—3 м/с больше, чем в ливневых. Максимальные значения w в наиболее крупных грозовых и градовых кучево-дождевых облаках могут превышать 50 м/с. В ливневых облаках $w_{\max} \approx 30... 40$ м/с [23 19].

2) Радиолокационная отражаемость

Важным для диагноза в ряде случаев является вопрос о закономерности хода отражаемости с высотой при наблюдении ливней, гроз, града. Оценка отражающих свойств элементов облаков и осадков основывается на взаимосвязанных параметрах, таких как эффективная площадь рассеяния отдельной частицы (σ_i), удельная площадь обратного рассеяния облачной среды и осадков (η), а также радиолокационная отражаемость (далее — РО) метеорологического объекта (Z) [16].

Удельная площадь рассеяния облаков и осадков η (м^{-1}) определяется следующим образом:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{V_3} \quad (1)$$

где N – общее количество рассеивающих частиц, находящихся в пределах эффективного объема V_3 отражающей области. Суммирование проводится по всему рассматриваемому объему.

Важно отметить, что удельная площадь рассеяния зависит от длины волны используемого радиолокатора (λ). Чтобы устранить эту зависимость и получить более универсальную характеристику, вводится понятие радиолокационной отражаемости (Z), измеряемой в м^3 :

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \eta \quad (2)$$

В практических радиолокационных наблюдениях отражательная способность облаков и осадков выражается в единицах $\text{мм}^6 \times \text{м}^{-3}$ или дБZ относительно эталонного значения Z_0 , равного $1 \text{ мм}^6 \times \text{м}^{-3}$. Преобразование

значений отражаемости, выраженных в разных единицах, осуществляется с использованием соответствующих формул:

$$Z (\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}) = 10^{18} Z (\text{м}^3) = 10^{12} Z (\text{см}^2), \quad (3)$$

$$Z (\text{дБZ}) = 10 \lg Z / Z_0, \quad (4)$$

$$Z (\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}) = 10^{0,1 \cdot Z} (\text{дБZ}). \quad (5)$$

Между радиолокационной отражаемостью метеоцели Z и её удельной площадью рассеяния η принципиальной разницы нет, однако метеорологи отдают предпочтение параметру Z [16, 25].

В кучево-дождевых облаках в среднем значение максимальной отражаемости для ливней равно $Z_{\max} = 2 \cdot 10^3 \text{ мм}^6/\text{мм}^3$ (33 дБZ), а для гроз $Z_{\max} = 3 \cdot 10^4 \text{ мм}^6/\text{мм}^3$ (45 дБZ) [26]. В грозовых облаках Z_{\max} располагается обычно выше, чем в ливневых. Град, в свою очередь, характеризуется высокой радиолокационной отражаемостью $Z_h > 45 \text{ дБZ}$. Значения, превышающие 60 дБZ, указывают на большие размеры мокрого града. Значения $Z_h > 80 \text{ дБZ}$, обычно считаются экстремальными. Нижний порог для сухого града на 5 дБZ ниже, чем для мокрого [16, 27-30].

Из рисунка 1.9, приведенного в [24], следует, что в зоне аккумуляции и роста градин (5—8 км) среднее значение отражающей способности (η) мало изменяется с высотой и находится в пределах $10^{-12,5} \leq \eta \leq 10^{-13} \text{ см}^{-1}$. Выше 8 км отражающая способность резко уменьшается. Максимальное значение η отмечается на 1—1,5 км ниже уровня максимума вертикальных скоростей воздушного потока.

На рисунках 1.14 и 1.15 приведены наиболее типичные профили отражаемости Z_{\max} (Н) на разных стадиях эволюции кучево-дождевых облаков для различных метеоявлений [25, 31]

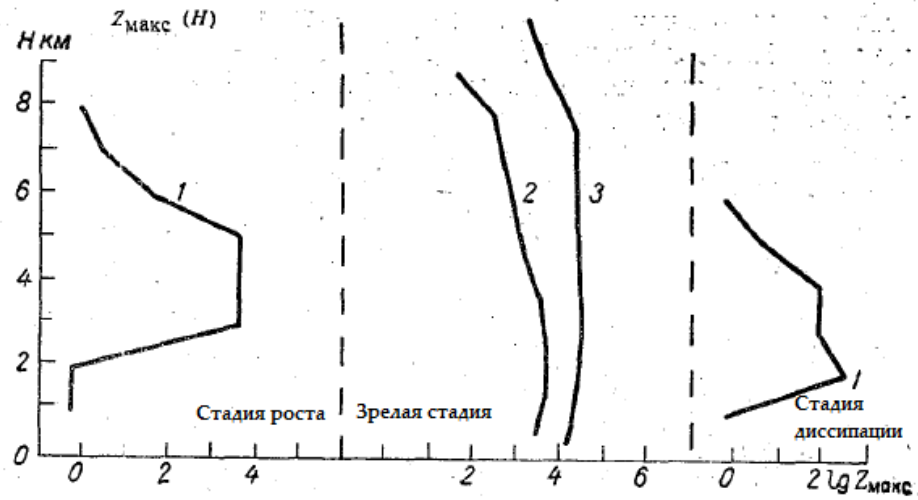


Рисунок 1.14 – Наиболее типичные профили максимальной отражаемости на разных стадиях Св. 1 – ливневой; 2 – грозовой; 3 – градовый профиль $Z(H)$ [25]

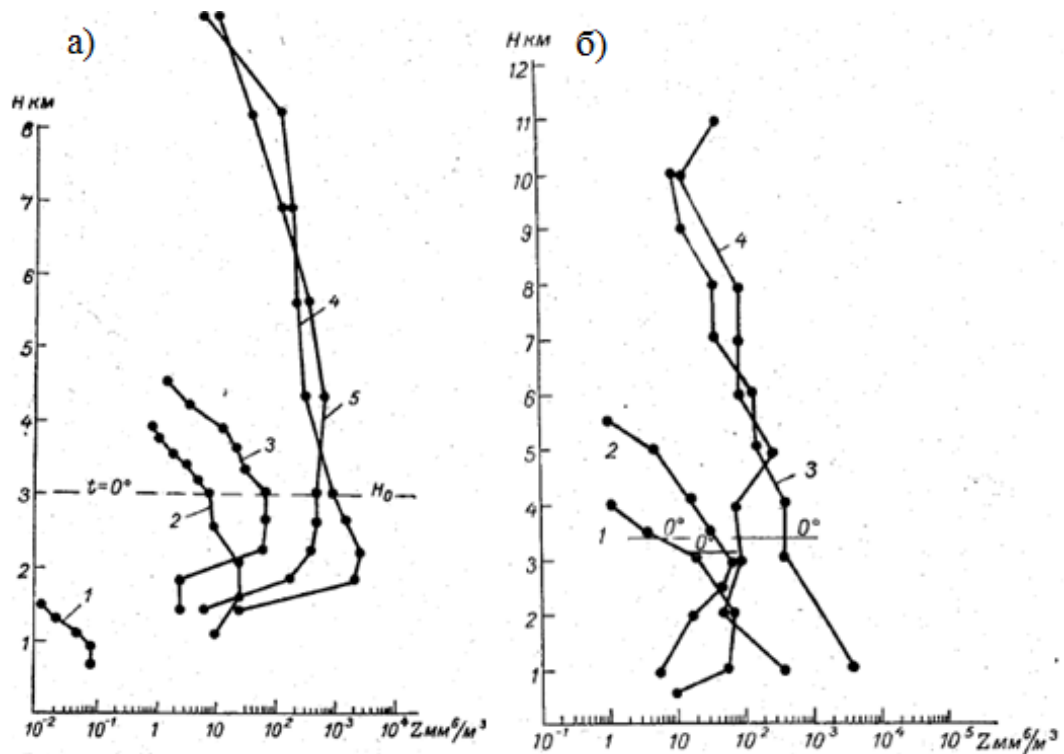


Рисунок 1.15 – а) Осредненные вертикальные профили отражаемости различных форм конвективных облаков. 1 – Cu (кучевое облако), 2 – Cusong (мощные кучевые облака), 3 – Cb (кучево-дождевое облако с ливнем), 4 - Cb (КДО предгроз.), 5 - Cb (КДО с грозой).;

б) Конкретные вертикальные профили отражаемости различных форм конвективных облаков 1 - Cusong (мощные кучевые облака). 3.09.1963 г., 2 - Cb (КДО с ливнем) 25.08.1962, 3 - Cb (КДО предгроз.) 3.09.1963 г., 4 - Cb (КДО с грозой) 4.09.1963 г. [31]

Каждая форма облаков имеет свой специфический и свойственный только ей ход $Z(H)$. В процессе развития конвективной облачности и перехода ее из одной формы в другую имеет место процесс трансформации вертикальной структуры радиоэха, отражающий микрофизические изменения в облаке, обусловленные ростом частиц и их перераспределения по высотам [31]. Анализ профилей радиолокационной отражаемости на разных стадиях развития облака, представленных на рисунках 1.13 и 1.14, что на начальной стадии роста кучево-дождевого облака вертикальный профиль радиолокационной отражаемости ($Z(H)$) обладает свойством симметрии относительно высоты максимальной отражаемости ($H_{Z_{max}}$). Как правило, точка $H_{Z_{max}}$ располагается на высотах, где температура воздуха выше 0°C . По мере удаления от этого уровня наблюдается убывание интенсивности отраженного сигнала. В момент наибольшей активности облака, когда происходят интенсивные осадки, наблюдается сглаживание вертикального градиента отражаемости ($Z(H)$). При этом, по сравнению со стадией роста, значения максимальной высоты (H_{max}) и максимальной отражаемости (Z_{max}) существенно возрастают. На этапе разрушения облака профиль отражаемости вновь приобретает симметричную форму, а значения H_{max} и Z_{max} уменьшаются. В отличие от стадии роста, уровень расположения $H_{Z_{max}}$ находится ниже нулевой изотермы и снижается по мере рассеивания облака. Таким образом, можно отметить, что трансформация кучево-дождевых облаков (Cb) из грозовых, с выпадением жидких осадков, в градовые, сопровождается следующими признаками: увеличение интенсивности и вертикального размера радиолокационного эха облака, а также повышение степени однородности распределения интенсивности радиоэха по высоте [25]. Также можно отметить, что переход облаков из кучевых в мощно-кучевые и кучево-дождевые сопровождается: а) увеличением интенсивности радиоэха от всей толщи облака, б) ростом высоты распространения радиоэха, в) увеличением равномерности распределения интенсивности радиоэха по высоте. Характерными особенностями завершающей стадии развития конвективной облачности, коими являются грозовые и предгрозовые кучево-дождевые облака, по сравнению с другими являются:

- максимальная интенсивность радиоэха, обусловленная существованием в облаке наиболее крупных частиц;
- максимальная высота радиоэха, вызванная большими вертикальными движениями в облаке;
- мало меняющейся с высотой интенсивностью радиоэха от большой переохлаждённой толщ, что является следствием значительного турбулентного перемешивания частиц в облаке [31].

Следовательно, вертикальное распределение отражаемости КДО характеризуется следующими ключевыми особенностями:

- Ярко выраженная зона с максимальным значением радиолокационной отражаемости $\lg Z_{\max}$ («ядра» и «ствола»);
- зависимость положения ядра в облаке от стадии развития облака;
- снижение отражаемости к верхней границе облака и к периферии;
- изменчивость отражаемости во времени для отдельного облака.

Распределение отражаемости в горизонтальной плоскости таких облаков более сложное, чем в вертикальной плоскости [25].

3) Водность

Величина радиолокационной отражаемости облачных образований и атмосферных осадков коррелирует с их водностью и интенсивностью. Данная взаимосвязь обусловлена тем, что оба указанных параметра определяются размерами частиц и законом их распределения по размерам. Отражаемость частиц определяется, в основном, крупными каплями, а водность – общим содержанием воды. Водность облака зависит от многих факторов и не остается постоянной в нем.

Для определения водности облаков на основе данных радиолокационного отражения требуется установить связь между отражаемостью и параметрами облачных частиц, в частности, их размером. В большинстве случаев эта зависимость представляется эмпирической формулой вида $Z = Aw_{об}^\beta$ где Z – радиолокационная отражаемость, $w_{об}$ – водность облаков (г/м^3), A и β – эмпирические параметры, зависящие от функции распределения частиц по размерам и скорости их падения. Значения параметров A и β определяются

региональными особенностями облачной микроструктуры. Данная зависимость используется в радиометеорологии для определения водности облаков.

Градовые облака характеризуются значительно большей водностью по сравнению с обычными конвективными облаками, сопровождающимися ливнями и грозами. Это обусловлено формированием более развитого облачного слоя с интенсивными восходящими потоками воздуха, что создает благоприятные условия для образования крупных градин, достигающих в диаметре до 30 мм [32].

Как показывают исследования, представленные в работе [33], минимальные значения водности (содержание воды в единице облачного объема q в $г/м^3$) практически одинакова для всех типов конвективных образований и составляет $0,01 г/м^3$. Однако, в градовых ячейках минимальное значение водности несколько выше и равно $0,02 г/м^3$. Максимальные значения водности демонстрируют существенные различия и варьируются от $0,09$ до $4,76 г/м^3$ в зависимости от интенсивности явления. Соответствующие изменения наблюдаются и в средних значениях водности для ячеек с различными типами конвекции (см. Таблицу 4).

Таблица 4 – Статистические характеристики значений водности конвективных ячеек с грозой и градом, $г/м^3$.

Вид явления в ячейке	Среднее значение	Медиана	Миним. значение	Максим. значение	Дисперсия
Без осадков	0,03	0,03	0,01	0,09	0,00
Ливень	0,07	0,06	0,01	0,36	0,00
Гроза	0,29	0,25	0,01	1,80	0,06
Град	1,72	1,59	0,02	4,76	1,29

Данные, характерные для Пермского края, представленные в работе [34] (Таблица 5), позволяют сравнить водность различных типов осадков. Так, водность при ливневых дождях составляет $2,44 г/м^3$, при грозах – $5,36 г/м^3$, а при выпадении града достигает $7,46 г/м^3$. Что касается градоопасных конвективных ячеек, то их вертикальный профиль водности отличается высокой степенью неоднородности. Минимальные значения водности ($0,02 г/м^3$) наблюдаются вблизи основания и вершины облака, а также у границ ядра радиоэха ($1,14 г/м^3$ для градоопасных

кучево-дождевых облаков), в то время как максимальные значения ($8,60 \text{ г/м}^3$) фиксируются на высоте 7 км. Средняя водность в ядре составляет $3,61 \text{ г/м}^3$. Интересно отметить, что в градоопасной ячейке часто присутствуют несколько слоев с повышенной водностью, которые пространственно совпадают с уровнями температуры -10 и -22°C .

Таблица 5 – Значение водности W (г/м^3) радиолокационных конвективных ячеек с ливнями, грозой и градом.

Вид явления в ячейке	Среднее	Минимальное	Максимальное
Ливень	0,24	0,04	2,48
Гроза	1,06	0,10	5,46
Град	3,61	1,14	8,60

Также в работе [35] приводится график вертикального профиля водности, характерный для роста и уменьшения грозовой активности (Рисунок 1.16).

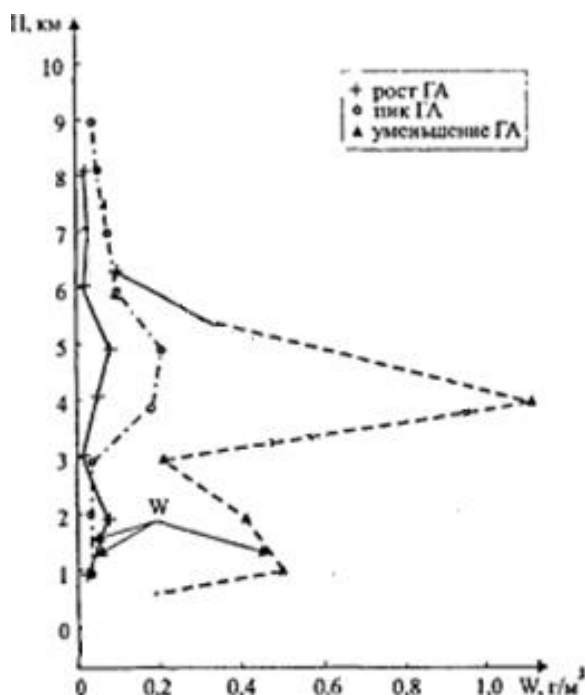


Рисунок 1.16 – Вертикальный профиль $W(H)$ в периоды роста, пика и уменьшения грозовой активности в облаке.

Радиолокационные и иные данные приводят к выводу о том, что в мощно-кучевых, ливневых и грозовых облаках водность не превышает $8\text{—}10 \text{ г/м}^3$, а в

среднем составляет 2-4 г/м³, а для градовых облаков значение водности значительно выше и составляет в среднем от 4–8 г/м³ [36].

Также одним из признаков развития кучево-дождевой облачности могут являться повышенные значения вертикально интегрированной водности (VIL), который в диссертационном исследовании не рассматривается. Этот параметр представляет собой суммарную массу жидкой воды, содержащуюся в вертикальном столбе облака, отнесенную к единице площади. Оценка VIL основывается на изменениях отражаемости радиолокационного сигнала, полученного от облака, и выражается в кг/м². Данный параметр может использоваться как надежный критерий выделения районов с ОЯ. Расчет VIL осуществляется по следующему алгоритму:

$$VIL = 3.44 * 10^{-6} \sum \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right)^{4/7} * \Delta h, \quad (6)$$

где Z_i обозначает радиолокационную отражаемость на i -том уровне высоты; Δh – интервал высоты между уровнями i и $i+1$. В силу того, что суммирование осуществляется по всему столбу радиолокационной отражаемости, любые факторы, ограничивающие точность ее определения, влияют на итоговое значение VIL.

Значения VIL в сильных грозах превышают 4-6 кг/м². Повышенные значения VIL являются предиктором гроз и града. Значение вертикальной интегрированной водности, для сильного ливня в течение 1 часа составляет 3 кг/м², а для крупного града не менее 16 кг/м² [37].

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что водность, как характеристика количества влаги, содержащейся в облаках, в значительной степени эквивалентна отражаемости. Это означает, что высокая водность облаков часто сопровождается высокой отражаемостью, и наоборот. Таким образом, оценка водности в рассматриваемых метеоявлениях необходимо рассматривать отдельно.

4) Турбулентность

Несмотря на то, что вертикальное распределение турбулентности в атмосфере для различных погодных условий изучено недостаточно, для каждого

случая метеоявлений высотное распределение турбулентности будет отличаться, как в случаях высотного распределения влажности, отражаемости и скорости ветра.

С 2001 г. ИКАО использует параметр EDR (скорость диссипации энергии турбулентности) в качестве стандарта измерения турбулентности. Первоначально (До 2007 г.) классификация интенсивности турбулентности основывалась на комбинации максимальных и осредненных за 15 минут значений EDR. Однако в 16-м издании Приложения 3 ИКАО был принят новый метод, основанный на кубическом корне из максимального значения скорости диссипации турбулентной кинетической энергии. Удельная скорость диссипации турбулентной кинетической энергии (далее — СДТЭ) — это физическая величина, которая описывает, насколько быстро кинетическая энергия турбулентных вихрей преобразуется в тепловую энергию из-за вязкости. Значения EDR прямо пропорциональны интенсивности турбулентности и используются для классификации степени воздействия турбулентности на воздушные суда, помогая пилотам и диспетчерам УВД принимать взвешенные решения о маршрутах и процедурах выполнения полета. Чем выше значение EDR, тем сильнее турбулентность и, следовательно, выше риск для воздушного судна.

В то время как ИКАО регламентирует использование параметра скорости диссипации турбулентной энергии, отечественные метеорологические радиолокационные станции, в частности доплеровские метеорологические радиолокаторы сантиметрового диапазона (далее – ДМРЛ-С), применяют альтернативный подход для оценки интенсивности турбулентности.

Согласно радиолокационным данным, развитие турбулентности в облачной среде характеризуется величиной скорости диссипации турбулентной энергии ϵ ($\text{см}^2/\text{с}^3$), оценка которой в программном обеспечении ВОИ «ГИМЕТ-2010» осуществляется на основе значений отражаемости Z , ширины доплеровского спектра W , а также сдвигов ветра S_g и S_v [11,12].

В настоящее время в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» карты «Турбулентность» строятся на высоте от 1 до 15 км с использованием градаций, указанных в таблице 6.

Таблица 6 – Градации интенсивности турбулентности.

$\varepsilon, \text{см}^2/\text{с}^3$	Характеристика турбулентности
0-10	Слабая
10-100	Умеренная
100-400	Сильная
>400	Очень сильная

Проведенный анализ частных случаев демонстрирует гетерогенность параметров скорости диссипации турбулентной энергии (ε) в зависимости от морфологических и динамических характеристик облачных структурах. По данным наблюдений, приведенных в работе [38], СДТЭ в облаках – составляет $100 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ для небольших облаков, $200 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ для развитых облаках, $700 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ для областей глубокой конвекции и до $2000 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ для гигантских кучево-дождевых облаков. Согласно другим данным, указанным в литературе [39] указано, что осредненное по масштабам порядка 10^2 м средние значения диссипации турбулентной энергии для грозовых облаков составляют $30\text{-}40 \text{ см}^2/\text{с}^3$, а максимальное значение в 10 раз больше.

В работе [40] приводятся характерные значения СДТЭ (ε) для различных синоптических явлений, подчеркивая, что эти величины могут отличаться на порядки как между различными типами облаков, так и внутри отдельных облаков, что свидетельствует о сложности и вариативности данного процесса. Так значения скорости диссипации турбулентности в ливневых облаках варьируется от $10^{-3} - 10^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$, а для мощных облаков значение ε находится в диапазоне от $10^{-3} - 1 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. Интенсивность турбулентности увеличивается с высотой в мощных облаках, оставаясь постоянной в ливневых облаках. При помощи погодного радиолокатора с частотой 94 ГГц в работах [41] и [42] были получены значения скорости диссипации турбулентности в перистых облаках, находящихся в диапазоне $10^{-8} - 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$, в слоисто-кучевых, меняющихся от 10^{-4} до $10^{-2} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$, а также в кучевых облаках, имеющих значение ε равное $10^{-3} - 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. Оценка скорости диссипации турбулентной энергии (ε) в кучево-дождевых облаках демонстрирует значительную вариативность в зависимости от метода измерений и области облака.

Так, данные, полученные с использованием авиационных измерений, показывают, что ϵ может достигать значений порядка $10^{-6} \text{ м}^2\text{с}^{-3}$, в то время как измерения доплеровским радиолокатором в области наковален кучево-дождевых облаков указывают на значения до $0,05 \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ [43]. Самолетные исследования грозовых облаков с градом позволили установить, что ϵ может изменяться в пределах от $0,006$ до $0,4 \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ [44]. Наблюдения за грозами, проведенные с помощью метеорологического доплеровского радиолокатора в регионе штата Колорадо, показали, что значения ϵ находятся в диапазоне от $0,003$ до $0,06 \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ [45]. Приведенные данные подчеркивают сложность и локальную изменчивость турбулентных процессов в кучево-дождевых облаках. Также для грозы были обнаружены значения скорости диссипации турбулентности до $0,15 \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в квазистационарной горной грозе [46], и до $3 \text{ м}^2\text{с}^{-3}$ в суперячейке грозы, полученные в окрестностях штата Оклахома [47].

Наибольшие значения ϵ в облаке находятся в пределах восходящих потоков. В ходе изучения отдельных случаев облачности было установлено, что максимальные значения ϵ локализуются в области основного восходящего потока [42-44, 47], а также на периферии восходящих потоков [48]. Наличие сильной турбулентности подтверждается высокой доплеровской дисперсией, наблюдаемой по краям восходящих потоков [49]. Кроме того, самые высокие показатели ϵ были зафиксированы в пространстве между основным восходящим и нисходящим потоками [45-46]. В работах [46-47] также указано, что сильная турбулентность существует непосредственно ниже по направлению движения от основного восходящего потока воздуха. Данные, полученные в ходе самолетных измерений скорости диссипации турбулентности (ϵ) в восходящих потоках облаков, показали, что вблизи областей с максимальной скоростью вертикального перемещения воздуха турбулентность выражена незначительно [48]. Тем не менее, обобщение независимых исследований позволяет утверждать, что наиболее сильная турбулентность в конвективных облаках обычно связана с восходящими потоками. Однако, положение максимумов скорости диссипации турбулентной энергии (ϵ) может изменяться. Наиболее часто, интенсивную турбулентность можно

обнаружить как вблизи границ восходящих потоков, так и в областях, расположенных сразу после ядра восходящего движения.

Результаты отдельных исследований турбулентности в облаках, выполненных с использованием различных методов (самолетные измерения, доплеровская радиолокация), указывают на сложную пространственную организацию этого явления. Интенсивность турбулентности, как правило, не меняется линейно с высотой. У основания облаков она обычно низкая [44], но возрастает по мере подъема до уровня свободной конвекции [48]. Такое поведение связывают с взаимодействием восходящего потока и окружающего воздуха. Выше уровня свободной конвекции происходит снижение турбулентности. Данные доплеровской радиолокации также подтверждают увеличение интенсивности турбулентности с высотой в нижних частях восходящих потоков [46]. Об этом свидетельствует увеличение значений доплеровской дисперсии внутри облаков [49]. Области с высокими значениями скорости диссипации турбулентной энергии (ϵ) часто располагаются в верхних частях облаков [45], причем их пространственный размер также увеличивается с высотой. Предполагается, что адвекция турбулентных вихрей играет важную роль в формировании пространственного распределения турбулентности [47]. Важно отметить, что области сильного сдвига ветра в небольших масштабах не всегда совпадают с областями высокой диссипации энергии [46], что может объясняться переносом турбулентности от места ее генерации.

Этот механизм может объяснять обнаружение сильной турбулентности ниже по потоку от восходящих движений: вихри турбулентности, создаваемые восходящими потоками, переносятся ветром, прежде чем рассеяться.

Измерения показали, что ϵ в конвективных облаках может изменяться на несколько порядков. Турбулентность тесно связана с областями сдвига ветра и подъемной силы. Самая сильная турбулентность часто наблюдается в непосредственной близости от восходящих потоков и, по-видимому, увеличивается по интенсивности в зависимости от силы восходящего потока. Во многих из этих исследований прослеживается устойчивая тенденция к тому, что

интенсивность турбулентности с высотой возрастает. Однако пространственное положение максимумов скорости диссипации турбулентности не всегда совпадает с местами генерации турбулентности из-за каскадных временных масштабов и адвекции турбулентных вихрей.

На текущем этапе исследований невозможно установить количественные зависимости между ε и характеристиками облачности, необходимые для надежной оценки параметров турбулентности. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на получение статистических зависимостей между ε и наблюдаемыми характеристиками облаков, такими как сдвиг ветра, интенсивность и размер восходящих потоков [40].

Следует отметить, что представленный параметр и шкала градации турбулентности различной интенсивности отличаются от параметра скорости диссипации турбулентной энергии, используемого ИКАО.

Для более точного параметра интенсивности турбулентности в авиации применяется удельная СДТЭ (EDR). Согласно стандартам ИКАО, экипажам воздушных судов получает информация о турбулентности в виде параметра EDR, представляющего собой корень кубический из скорости диссипации вихревой энергии (ε). Математически это выражается следующим образом [54]:

$$EDR = \varepsilon^{1/3} \quad (7)$$

Интенсивность турбулентности, в соответствии с классификацией ИКАО (пп. 2.6.2-2.6.3 документа [54]), подразделяется на несколько градаций, представленных в таблице 7:

Таблица 7 – Градации EDR согласно классификации ИКАО

Характеристика турбулентности	EDR, м ^{2/3} /с
нулевая	≤0,1
слабая	0,1-0,4
умеренная	0,4-0,7
сильная	>0,7

Именно этот параметр с его пространственными и временными распределениями будет рассмотрен в диссертационном исследовании.

5) Температура

Для формирования грозовых явлений необходимо, чтобы температурный показатель в верхней части конвективного облака не превышал температуры минус 27°C [50]. Однако другие исследования, проведенные Брейамом и Байесом, свидетельствуют, что температурный порог на вершине радиоэха гроз должен быть ниже минус 20°C . В свою очередь, разработанная модель прогнозирования Н. В. Лебедевой использует диапазон температур от минус 20°C до минус 25°C в пиковой части облаков, что нужно для образования грозы. [24]. Как правило, нижняя часть облаков находится чаще всего в более теплой области с положительными температурами, а срединная часть облака располагается между изотермами 0° и минус 20° [8]. Образование града – сложный атмосферный процесс, основанный на круговороте воды. Благоприятной для роста града является температура воздуха в переохлажденной части грозового облака от -10 до -25°C . Рост града становится исчезающе малым, когда температура воздуха падает ниже -30°C , поскольку при таких температурах капли переохлажденной воды становятся редкими. Ливневые же осадки образуются при температуре выше 0°C .

б) Напряжение, Токи

Для понимания процессов электризации в грозовых облаках первостепенное значение имеют измерения напряженности электрического поля, в частности, ее вертикальных составляющих, а также определение электропроводности облачной среды. Информация о вертикальном распределении напряженности электрического поля (E) в активной части грозового облака позволяет получить представление о его внутренней электрической структуре и рассчитать величины основных зарядов [51]. В облаках для возникновения грозовых разрядов достаточно, чтобы напряженность поля достигла 300-350 тыс. В/м.

Распознавание характера явлений, сопровождающих кучево-дождевые облака (ливневые осадки, грозы, град), являются одной из основных задач метеорологической радиолокационной станции. Поскольку МРЛС не фиксирует грозовые разряды при обычной регистрации эхо-сигналов, грозовое состояние

облака определяют по косвенным признакам, базируясь на широко известном факте, что наивысшая активность молний обычно связана с районом наибольшей активности осадков.

Вывод:

Ливень, гроза и град, обусловленные КДО, существенно различаются по гидродинамическим параметрам. Наиболее характерными являются отражаемость и турбулентность атмосферы, и их распределение по высотам для различных стадий развития КДО. К тому же данные параметры должны проявляться в параметрах отраженного сигнала при дистанционном зондировании КДО метеорологической РЛС. Оценив эти параметры, определив их особенности и взаимосвязь для перечисленных явлений мы существенно продвинемся в решении задачи их достоверной классификации.

1.2. Обоснование приоритетных направлений повышения достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений.

1.2.1. Анализ критериев классификации, используемых в современных МРЛС

На сегодняшний день на территории РФ метеорологические явления классифицируются с использованием радиолокационных систем ДМРЛ-С (С-диапазон), АМРЛК "Монокль" (Х-диапазон) и МРЛ-5. Классификация опасных метеорологических явлений базируется на критериях, определяемых посредством анализа пространственного распределения радиолокационной отражаемости Z и

вертикального профиля температуры атмосферы, представленных в Приложении А.

Методология радиолокационной классификации конвективных процессов, обусловленных кучево-дождевыми облаками, предполагает их разделение на три принципиальные группы [6]:

- I — грозовые и градоопасные облака, сопровождаемые выпадением града,
- II — грозоопасные облака и ливневые дожди с грозами,
- III — негрозоопасные конвективные облака и ливни без гроз.

Значение радиолокационной отражаемости, как меры интенсивности отраженного сигнала, изменяется по всей вертикальной протяженности облака, от его основания до верхней границы. В конвективных облаках, характеризующихся ливневыми осадками, максимальные значения отражаемости (Z_1) обычно располагаются вблизи уровня 0°C . В грозовых и градовых облаках наблюдается смещение зоны максимальной отражаемости на высоту, соответствующую уровню Z_2 , который на 2 км превышает уровень Z_1 .

Критерии классификации для ДМРЛ-С

Для классификации опасных метеорологических явлений современные метеоролокаторы типа ДМРЛ-С применяют комплексный подход, основанный на анализе таких параметров как высота верхней границы облаков (далее – ВГО), вертикальный профиль радиолокационной отражаемости и температура.

Распознавание ливневых осадков в ДМРЛ-С осуществляется путем сопоставления высоты ВГО ($H_{ВГО}$) с показателями радиолокационной отражаемостью, измеренной на двух ключевых уровнях: Z_1 (от 0.6 до 1 км) и Z_2 (от 2 до 4 км). Идентификация обложных осадков производится на основе значений радиолокационной отражаемости на уровне Z_1 [5]. Для всех градаций ливневых осадков является превышение отражаемости на уровне Z_2 значения «0», при этом:

- **Слабый ливень** (в теплое время года) определяется при $Z_1 \geq 28$ дБZ;
- **Умеренный ливень** при $Z_2 \geq 37$ дБZ;
- **Сильный ливень** соответствует значению $Z_2 \geq 44$ дБZ.

Классификация гроз и града базируется на анализе $H_{ВГО}$, значений радиолокационной отражаемости (Z) на уровне нулевой изотермы ($H_{0^{\circ}C}$ или H_2) и на уровне интенсивной кристаллизации (H_3 , который располагается на $2 \div 2.5$ км выше уровня нулевой изотермы), а также максимального значения отражаемости в вертикальном столбе (Z_{max}).

Для идентификации гроз по данным метеорологических радиолокаторов на данный момент в РФ используется единая утвержденная методика. Согласно этой методике, гроза классифицируется на основе комбинации параметров: высоты ВГО $H_{ВГО}$, отражаемости Z_3 , измеренной на уровне $H_3 = H_0 + 2$ (2,5 км) и вычисленного критерия грозоопасности $Y = H * lgZ$ (Таблица 8) [52].

Таблица 8 – Пороговые значения $H_{ВГ}$, Z_3 , параметра грозоопасности Y для обнаружения грозы

Параметр	Гроза вероятности 30 – 70 %	Гроза вероятности 71 – 90 %	Гроза вероятности более 90 %
$H_{ВГ}$	6	7	8
Z_3	28	34	34
Y	200	310	320

Классификация градовых осадков основывается на трех основных критериях: превышение установленных пороговых значений высоты ВГО и значение отражающей способности на уровне Z_3 (уровень максимальной кристаллизации); наличие в облаке слоя с Z_{max} , превышающим установленный порог, что свидетельствует о высокой концентрации достаточно крупных гидрометеоров; превышение параметром вертикального профиля отражающей способности (Y) значения, указанного в таблице 7, а также порогового значения $Y_{кр}$, определяемого как произведение высоты изотермы минус $22^{\circ}C$ и порогового значения Z_3 [53].

Таблица 9 – Пороговые значения $N_{вг}$, Z_3 , Z_{max} , Y для обнаружения града

Параметр	Град слабый	Град умеренный	Град сильный
$N_{вг}$	7	7	8
Z_3	40	40	40
Z_{max}	55	60	65
Y	100	100	100

Критерии классификации для АМРЛК

В АМРЛК для распознавания ливней используются данные на уровнях Z_1 – радиолокационная отражаемость на высоте от 0 до 2 км и Z_2 – радиолокационная отражаемость на высоте от 2 до 4 км:

- В условиях *слабого ливня* величина Z_1 варьируется в пределах от 10 до 40 дБZ.
- Для *умеренного ливня* значение отражаемости Z_1 находится в пределах 20-45 дБZ;
- *Сильный ливень* классифицируется при значениях $25 < Z_1 < 50$ дБZ.

Для распознавания гроз используются данные порогового значения комплексного критерия грозовой опасности Y , максимального и минимального значения радиолокационной отражаемости на уровне $H_3 = H_0 + 2500$ м – Z_{H3_max} , Z_{H3_min} (Таблица 10). Пороговое значение комплексного критерия грозовой опасности для АМРЛК рассчитывается по формуле:

$$Y = 0,001 \cdot N_{вг} \cdot Z_{H3}. \quad (8)$$

Таблица 10 – Пороговые значения параметров для обнаружения грозы

Гроза вероятности 30 – 70 %	Гроза вероятности 71 – 90 %	Гроза вероятности более 90 %
$10 < Y < 30$	$10 < Y < 40$	$10 < Y < 50$
$10 < Z_{H3 \min} < 40$ дБZ	$10 < Z_{H3 \min} < 50$ дБZ	$10 < Z_{H3 \min} < 60$ дБZ
$50 < Z_{H3 \max} < 70$ дБZ	$50 < Z_{H3 \max} < 70$ дБZ	$50 < Z_{H3 \max} < 70$ дБZ

Град классифицируется с использованием данных порогового значения разности высот $H_3 = (H_0 + 2500)$ м и H_0 – абсолютная высота изотермы 0°C м и максимального значения отражаемости по всему объема облака Z_{\max} :

Слабый град имеет значения параметров - $1000 < \Delta H < 5000$ м, $30 < Z_{\max} < 50$;

Умеренный град - $1000 < \Delta H < 5000$ м, $40 < Z_{\max} < 60$;

Сильный град - $1000 < \Delta H < 5000$ м, $40 < Z_{\max} < 70$.

Вывод:

Критерии классификации метеоявлений, используемые в отечественных метеорологических РЛС ДМРЛ-С и АМРЛК, были сформированы в соответствии с руководящими документами [54, 55], в которых даны универсальные параметры для определения класса метеорологического явления в метеолокаторах с различными тактико-техническими характеристиками. Характерно, что все законодательно принятые критерии классификации метеоявлений от облачности до смерча громоздки, разработаны для каждого явления отдельно, а также носят интервальный и некоторый эвристический характер, не позволяющий их интерпретировать однозначно. Кроме того, такие критерии требуют знания высотного рельефа температуры, измерить который с высокой дискретностью в пространстве и времени проблематично.

1.2.2. Обоснование приоритетных путей повышения достоверности

Очевидно, что критерии классификации требуют оптимизации связанной, в первую очередь, с использованием единого подхода (критерия) для всех метеоявлений. Кроме того, необходимо адаптировать критерий под конкретные ТТХ и информационные возможности метеорологической РЛС.

Приоритетные пути повышения достоверности классификации опасных метеоявлений рассмотрим на примере АМРЛК. На сегодняшний день разработан, успешно испытан и принят на вооружение Аэродромный метеорологический радиолокационный комплекс «Монокль». Отличительная черта комплекса — компактные массогабаритные параметры. АМРЛК полностью отвечает актуальным международным и национальным стандартам. АМРЛК с использованием передовой технологии импульсно-доплеровской обработки данных способен обеспечивать метеорологические службы и подразделения аэродромов всех видов авиации, а также других потребителей, актуальной радиолокационной метеоинформацией в радиусе не менее 100 км. Основные сферы применения комплекса включают аэродромы, посадочные площадки, зоны приземления и районы, где возможны чрезвычайные ситуации, особенно в условиях ограниченной инфраструктуры [56].

Принцип работы АМРЛК заключается в излучении зондирующих радиоимпульсов, последующем приеме и обработке отраженных сигналов, их оцифровке, а также вторичной и третичной обработке полученной информации для последующего отображения.

В состав АМРЛК входят: приемно-передающий антенный модуль с интегрированным вычислителем и автоматизированное рабочее место оператора. Антенна представляет собой щелевую антенную решетку (ЩАР) диаметром около 760 мм, обеспечивающую ширину диаграммы направленности в пределах 3 градусов. Приемно-передающий модуль выполнен по когерентной твердотельной технологии, что позволяет формировать и обрабатывать сложные сигналы, а также изменять частоту повторения импульсов и длительность интервалов когерентной обработки.

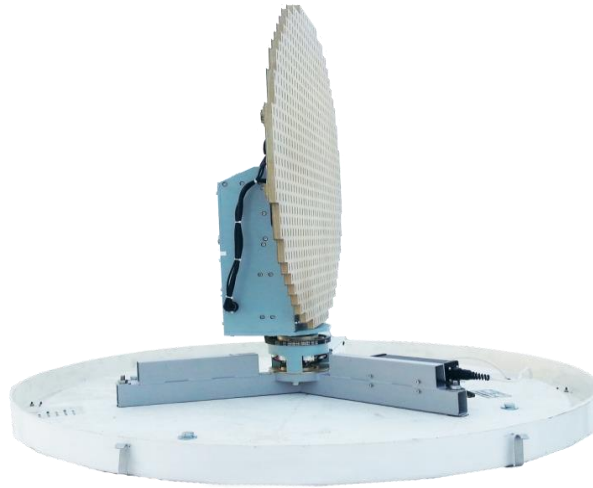


Рисунок 1.17 – Антенное устройство АМРЛК без РПО.

В таблице 11 представлены тактико-технические характеристики АМРЛК.

Таблица 11 – Тактико-технические характеристики АМРЛК

Наименование характеристики	Значение
Мощность излучения в импульсе	100 Вт
Рабочая частота	9330-9375 МГц
Тип антенны	Щелевая антенная решетка с горизонтальной поляризацией
Ширина ДНА	3° 15' x 3° 15'
Метеорологический радиолокационный потенциал	не менее 250 дБ
Размеры	диаметр - 115 см, высота - 110 см
Масса	не более 70 кг
Периодическое техническое обслуживание	не требуется

АМРЛК обладает гибкостью в отображении метеоинформации, адаптируя их под решение конкретных задач. При стандартном круговом режиме сканирования метеоинформация группируется в ячейки с горизонтальным размером 1×1 км и с шагом по вертикали в 1 км. При переходе в секторный режим (ширина сектора составляет до 70°) система повышает детализацию для точного измерения ветровых характеристик: при этом размер горизонтальных ячеек сокращается до 400×400 м,

вертикальное разрешение достигает 500 м, а частота дискретизации увеличивается как по времени, так и по пространству. На рисунке 1.18 показана карта метеоявлений, классифицируемая в ячейках при стандартном круговом обзоре АМРЛК. На рисунке 1.19 показана карта вертикального сдвига ветра в секторном режиме сканирования пространства АМРЛК.

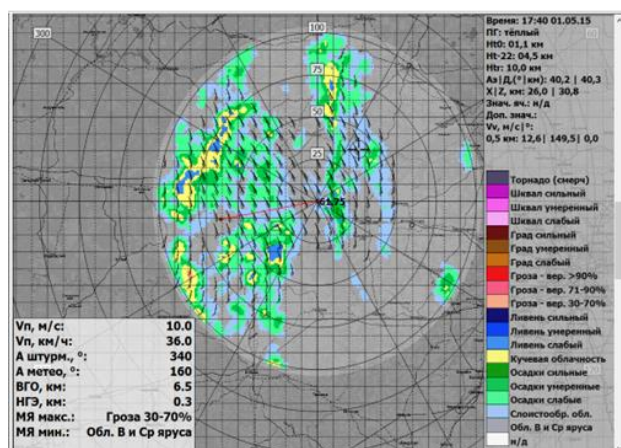


Рисунок 1.18 – Карта метеорологических явлений в ячейках при круговом обзоре АМРЛК

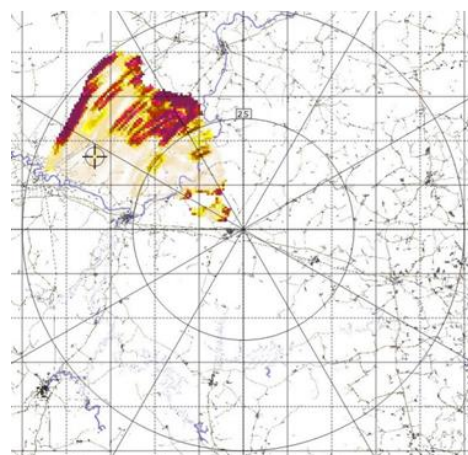


Рисунок 1.19 – Карта вертикального сдвига ветра в секторном режиме АМРЛК

Критерии классификации метеоявлений, используемые в ДМРЛ-С и АМРЛК [57], были сформированы в соответствии с руководящими документами [54, 55], в которых даны универсальные параметры для определения класса метеорологического явления в метеолокаторах с различными тактико-техническими характеристиками.

Остановимся на задаче классификации ОМЯ характерных для европейской части России и связанных с КДО, таких как ливень, гроза, град. Современные критерии классификации указанных метеорологических явлений базируются на данных о: распределении радиолокационной отражаемости по высотам и температуре профиле атмосферы (в том числе высоте нулевой изотермы). Соответствующая информация представлена в Таблице 12.

Таблица 12 – Критерии классификации ОМЯ КДО

Используемые параметры атмосферы: Z1 – радиолокационная отражаемость на высоте от 0 до 2 км, dBZ; H0 – абсолютная высота изотермы 0 °С, м; H3 – высота (H0 + 2500), м.	
Ливневые осадки (ливень слабый, умеренный и сильный)	
Пороговое значение отражаемости Z1, dBZ	От 10 до 40 (ливень слабый) От 20 до 45 (ливень умеренный) От 25 до 50 (ливень сильный)
Грозы	
Максимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H3, dBZ	От 50 до 70
Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H3, dBZ	От 10 до 40 (гроза вероятности 30 – 70 %) От 10 до 50 (гроза вероятности 71 – 90 %) От 10 до 60 (гроза вероятности более 90 %)
Град (слабый, умеренный, сильный)	
Пороговое значение разности высот H3 и H0, м	От 1000 до 5000
Максимальное значение радиолокационной отражаемости по всему объему облака, dBZ	От 30 до 50 (град слабый) От 40 до 60 (град умеренный) От 40 до 70 (град сильный)

Очевидными недостатками данных критериев являются:

- необходимость наличия информации о вертикальном температурном профиле атмосферы, которая может быть получена путем запуска радиозондов или по данным температурных профиломеров МТП-5. Выпуск радиозондов на территории РФ осуществляется два раза в сутки: в 0 и 12 UTC - что недостаточно ввиду динамично развивающихся опасных явлений погоды ливня, грозы, града. Температурный профиломер обеспечивает измерение температуры воздуха в пограничном слое атмосферы до высоты 1 000 м. Однако данный диапазон недостаточен для классификации опасных метеорологических явлений, поскольку их пороговые критерии, согласно Таблице 10, зачастую располагаются выше указанного уровня;
- несмотря на доказанную связь ливней, гроз и града с повышенной турбулентностью в кучево-дождевых облаках, данный параметр не включён в

систему классификационных критериев. В ходе всех испытаний было показано, что АМРЛК с требуемой точностью оценивают ветровые характеристики атмосферы;

- отсутствие в современных критериях классификации единого статистического подхода, что затрудняет их систематизацию и оптимизацию в соответствии с теорией различения статистических гипотез [58-61].

Вывод:

Основные направления оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, определим следующим образом:

- использование в критериях классификации ОМЯ информации о высотном распределении не только отражаемости, но и турбулентности атмосферы;
- формирование параметрических описаний плотностей распределения максимальной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте;
- разработка алгоритмов классификации ОМЯ (формирования порогов принятия решений) в соответствии с единым выбранным критерием различения статистических гипотез.

1.3. Постановка научной задачи

Для постановки задачи диссертационных исследований сформулируем основные выводы из представленных материалов.

Современное метеорологическое обеспечение полетов на аэродромах сталкивается с рядом серьезных недостатков, которые требуют незамедлительного решения. К этим недостаткам относятся: недостаточный уровень технического оснащения, использование устаревших методов передачи данных, значительный

износ и моральное устаревание оборудования для проведения метеонаблюдений, недостаточное развитие сети современных метеорологических РЛС. Системные проблемы во взаимодействии между метеорологическими службами и службами управления воздушным движением усугубляют ситуацию, создавая реальные риски, которые могут привести к трагическим последствиям.

Вместе с этим метеорологическая обстановка является одним из решающих факторов, определяющих безопасность и регулярность полетов гражданской авиации. Опасные метеорологические явления, наиболее характерные для европейской части России и связанные с кучево-дождевой облачностью, такие как **ливень, гроза, град** в сочетании с сопровождающей их высокой турбулентностью атмосферы нередко приводят к авиационным событиям и даже авиакатастрофам воздушных судов. Наибольшую опасность данные явления представляют при проведении ВС взлетно–посадочных операций.

Возрастающая необходимость получения данных о метеорологической обстановке для обеспечения безопасности полетов воздушных судов актуализирует разработку высокоэффективных радиолокационных систем дистанционного сбора и обработки информации, в том числе, для решения задач классификации опасных метеоявлений.

В настоящее время на территории РФ используется современный метеолокатор ДМРЛ-С разработки Лианозовского электромеханического завода. Мощная импульсно – доплеровская РЛС функционирует в структуре Росгидромета и обеспечивает оперативный анализ метеообстановки на дальностях больше 300 км. Однако данные РЛС не всегда устанавливаются вблизи аэродромов, где информация о метеообстановке остро необходима.

С учетом данной проблемы в настоящее время создан, испытан и эксплуатируется уникальный отечественный метеорологический радиолокационный комплекс «Монокль» X диапазона с низкими массогабаритными характеристиками, в полной мере соответствующий современным международным и отечественным требованиям. АМРЛК с импульсно – доплеровской обработкой информации обеспечивает предоставление

метеоинформации метеорологическим службам и подразделениям аэродромов различных видов авиации, а также другим потребителям радиолокационной метеорологической информации в радиусе не менее 100 км. Областью применения АМРЛК являются аэродромы, посадочные площадки, районы возможных чрезвычайных ситуаций особенно в районах с неразвитой инфраструктурой.

Критерии классификации метеоявлений, используемые в АМРЛК, сформированы в соответствии с действующими руководящими документами, разработанными в свое время для устаревших метеорологических РЛС (МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5), давно не используемых на практике. Характерно, что все законодательно принятые критерии классификации метеоявлений разработаны для каждого явления отдельно и носят интервальный характер, не позволяющий их толковать однозначно. Несовершенство критериев существенно затрудняет классификацию в особенности опасных метеоявлений с приемлемой достоверностью.

Таким образом, имеет место **противоречие в практике** между обеспечением безопасности полетов по причинам, связанным с представлением достоверной метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и необходимостью повышения достоверности метеоинформации в метеосводках об опасных метеоявлениях в районе аэродрома с учетом наличия ограничений существующих технологий и методов мониторинга опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в современных метеорологических РЛС.

Путем разрешения данного противоречия является совершенствование критериев классификации ОМЯ КДО в современных метеорологических РЛС на примере АМРЛК с учетом их технических возможностей.

Установленные критерии классификации от облачности до смерча помимо знаний о высотном распределении радиолокационной отражаемости, основаны на анализе температурного профиля атмосферы (высоте нулевой изотермы, высоте изотермы -22°C). Необходимо учесть, что вертикальный температурный профиль от поверхности земли до десятков км строится по данным радиозондов, которые в лучшем случае запускаются 2 раза в сутки. Измерение же температуры на уровне

аэродрома не позволяет пролонгировать высотный профиль по стандартной атмосфере с учетом возможной и нередко встречающейся температурной инверсии, а также особенностей изменяющего температурного градиента. То есть температурный профиль не является устойчивым и информативным признаком классификации ОМЯ.

Также известно, что такая последовательность ОМЯ КДО, как ливень, гроза, град всегда сопровождается возрастающей турбулентностью атмосферы. АМРЛК, построенный по импульсно–доплеровскому принципу обработки сигналов, обеспечивает эффективное обнаружение ВХА, а также оценивает интенсивность ее турбулентности в конкретных точках пространства.

Отсюда вытекает **противоречие в теории** между необходимостью достоверной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома и отсутствием соответствующего метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома.

Достоверность в задачах классификации ОМЯ понимается как вероятность правильной классификации ОМЯ КДО при ограничениях на вероятности перепутывания и неверной классификации.

Перечисленные факторы определяют актуальность исследований, направленных на достижение **цели** – повышение достоверности метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и как следствие, повышение качества метеорологического обеспечения полётов в районе аэродрома путем разработки метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» с учётом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

Для достижения поставленной цели выдвинута **научная гипотеза**, заключающаяся в том, что путем совместного использования информации о высотном распределении отражаемости и турбулентности атмосферы, а также применения единого для всех ОМЯ критерия, основанного на теории различения

статистических гипотез, можно найти оптимальный метод, обеспечивающий классификацию ОМЯ КДО с заданной достоверностью.

Для достижения цели в работе решается актуальная **научная задача** по разработке метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе, с учетом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы

Объект исследования: метеорологическое обеспечение полётов в районе аэродрома при возникновении опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью.

Предмет исследования: метод и алгоритмы обработки метеоинформации, направленные на классификацию опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности, ориентированные на повышение достоверности классификации и снижение рисков для полетов воздушных судов.

Рамки исследования:

- диапазон излучаемых волн – X;
- дальность классификации – до 100 км;
- алфавит классов: ливень, гроза, град;
- рассматривается весенне-осенний период.

Научную задачу можно сформулировать в формализованном виде следующим образом:

$$K_{opt} = \operatorname{argmax} P_{ii}(K/A, \Pi, \Psi, t_{\text{кн}}, P_{ij} \leq \text{const}) \quad (9)$$

где:

K – критерий классификации;

P_{ii} – вероятность правильной классификации;

$A = \{\text{ливень, гроза, град}\}$ – рабочий алфавит классов;

$\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$ – рабочий словарь признаков;

Ψ – циклограмма обзора пространства;

$t_{\text{кн}}$ – интервал когерентного накопления на одной угловой позиции;

P_{ij} – вероятности неверной классификации.

Учитывая изложенное, решение поставленной научной задачи заключается в выборе оптимального критерия, который обеспечит классификацию ОМЯ КДО из алфавита классов: ливень, гроза, град с максимальными вероятностями правильной классификации при ограничениях на вероятности ошибочных решений для выбранного словаря признаков, основанных на знаниях о высотном распределении отражаемости и турбулентности атмосферы, точность оценки которых зависит от принятой циклограммы обзора РЛС и, соответственно, времени когерентного накопления сигнала на каждой угловой позиции.

Постановка задачи классификации метеорологических явлений в рассматриваемом случае предполагает решение следующих задач:

- формирование алфавита классов, то есть набора классифицируемых явлений, в нашем случае ливень – гроза – град;
- выбор признакового пространства, то есть тех информационных параметров, в нашем случае отражаемость и турбулентность атмосферы, которые выделяются из отраженного радиолокационного сигнала и позволяют классифицировать явления с заданной достоверностью;
- определение достаточной статистики, то есть того вероятностного описания признаков и явлений, которые будут использованы при классификации;
- выбор критерия классификации;
- анализ эффективности разработанного метода критерия классификации.

В общем случае, данная последовательность задач является итерационной и предполагает коррекцию алфавита, признаков и критериев для достижения требуемой достоверности распознавания при ограничениях на ресурсы.

Очевидно, что критерий классификации будем выбирать на основании байесовского подхода, как наиболее общего в теории различения статистических гипотез [58-61].

Обозначим метеоявление символом ω , причем для ливня $\omega=l$, для грозы $\omega=gз$, а для града $\omega=gд$. Величина ω рассматривается как случайная величина в том смысле, что состояние природы не известно. В нашем случае положим, что априорные вероятности событий также не известны. Для упрощения задачи без

потери качества ее решения примем очевидное допущение: достаточной статистикой в рассматриваемом случае является условная плотность распределения признака x при наблюдении метеоявления ω_i $p(x/\omega_i)$, где $i \in \{л, гз, гд\}$. Данная статистика позволяет сформировать решение на основе метода максимального правдоподобия: выбирается то решение $\omega=i$, для которого

$$p(x/\omega_i) > p(x/\omega_k) \text{ для всех } k \neq i \quad (10)$$

Достаточные статистики, сформированные без использования сведений, содержащихся в априорном распределении и функции потерь, определяют структуру оптимального решения и оптимальный способ обработки информации. Представленная характеристика подчеркивает их адаптивность и адекватность при проектировании информационных систем для широкого спектра задач, в том числе при наличии априорной неопределенности [60].

Априорная неопределённость может варьироваться в широких пределах. Далее проанализируем задачу с полной априорной неопределенностью, когда неизвестны ни виды, ни параметры законов распределения вероятностей информационных параметров. Казалось бы, при такой полной априорной неопределенности статистический синтез невозможен, потому что нельзя ни сформулировать, ни вычислить критерий оптимальности. Однако вместо неизвестных распределений могут быть использованы эмпирические данные, которые называют обучающими выборками.

Задача преодоления полной априорной неопределенности может быть решена в три этапа:

- на первом этапе, исходя из физической сущности решаемой задачи, определяется класс возможных распределений вероятностей, ограниченный некоторым семейством с произвольными значениями параметров (в нашем случае семейство распределений, близких к гауссовому);

- на втором этапе на основании принятых в статистической теории непараметрических критериев согласия (Колмогорова, Смирнова, χ^2 Пирсона и т.д.) проверяются гипотезы о соответствии данных наблюдения одному из заданных в семействе теоретическому распределению вероятностей информационного параметра [62];

- на третьем этапе уже параметрическая неопределенность устраняется использованием в качестве истинных значений параметров их оптимальных оценок, например, выборочных математических ожиданий (далее — МО) и среднеквадратических отклонений (далее — СКО).

Формализованная постановка задачи и проведенный анализ позволяют произвести ее корректную декомпозицию и сформулировать частные задачи.

1. Обоснование современных требований к достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений, связанных с кучево – дождевой облачностью.

2. Обоснование исходных данных метода классификации опасных метеоявлений в условиях априорной неопределенности.

3. Разработка байесовского метода классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

4. Разработка практических рекомендаций по классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности в АМРЛК.

Выводы по 1 главе:

1. Недостаточное метеорологическое обеспечение, будь то неисправность оборудования, неверная интерпретация данных, или проблемы в коммуникации между службами, может иметь трагические последствия. Несмотря на достигнутый прогресс, задача обеспечения полной достоверности информации

об ОМЯ в метеосводках остается нерешенной и требует дальнейших усилий в области исследований, разработок и практического применения.

2. Одним из наиболее важных факторов, влияющим на безопасность полетов, является метеорологическая обстановка. Наиболее опасны и часто встречаются на территории РФ такие метеорологические явления, как ливень, гроза и град. Данные явления возникают в результате развития кучево-дождевых облаков и характеризуются значительной турбулентностью атмосферы. В целях обеспечения безопасности полетов необходимо заблаговременно уведомлять экипажи о возможности столкновения с такими условиями, в особенности при выполнении взлетно-посадочных маневров.

3. Ливень, гроза и град, обусловленные КДО, существенно различаются в основном по гидродинамическим параметрам. Наиболее характерными являются отражаемость и турбулентность атмосферы, и их распределение по высотам для различных стадий развития КДО. К тому же данные параметры должны проявляться в параметрах отраженного сигнала при дистанционном зондировании КДО метеорологической РЛС. Оценив эти параметры, определив их особенности и взаимосвязь для перечисленных явлений мы существенно продвинемся в решении задачи их достоверной классификации.

4. Критерии классификации метеоявлений, используемые в отечественных метеорологических РЛС ДМРЛ-С и АМРЛК, были сформированы в соответствии с руководящими документами, в которых даны универсальные параметры для определения класса метеорологического явления в метеолокаторах с различными тактико-техническими характеристиками. Характерно, что все законодательно принятые критерии классификации метеоявлений от облачности до смерча громоздки, разработаны для каждого явления отдельно, а также носят интервальный и некоторый эвристический характер, что затрудняет их однозначную интерпретацию. Кроме того, для их применения необходимо знать высотное распределение температуры, измерение которой представляет определенную сложность.

5. Основные направления оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, определим следующим образом:

- использование в критериях классификации ОМЯ информации о высотном распределении не только отражаемости, но и турбулентности атмосферы;
- формирование параметрических описаний плотностей распределения максимальной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте;
- разработка алгоритмов классификации ОМЯ (формирования порогов принятия решений) в соответствии с единым выбранным критерием различения статистических гипотез.

6. Имеет место **несоответствие в практике** между обеспечением безопасности полетов по причинам, связанным с представлением достоверной метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и необходимостью повышения достоверности метеоинформации в метеосводках об опасных метеоявлениях в районе аэродрома с учетом наличия ограничений существующих технологий и методов мониторинга опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в современных метеорологических РЛС.

7. Имеет место **несоответствие в теории** между необходимостью достоверной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома и отсутствием соответствующего метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома.

8. Перечисленные факторы определяют актуальность исследований, направленных на достижение **цели** – повышение достоверности метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и как следствие, повышение качества метеорологического обеспечения полётов в районе аэродрома путем разработки метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» с учётом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы. Для достижения поставленной цели

выдвинута **научная гипотеза**, заключающаяся в том, что путем совместного использования информации о высотном распределении отражаемости и турбулентности атмосферы, а также применения единого для всех ОМЯ критерия, основанного на теории различения статистических гипотез, можно найти оптимальный метод, обеспечивающий классификацию ОМЯ КДО с заданной достоверностью. В работе решается актуальная **научная задача** по разработке метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе, с учетом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

9. Формализованная постановка задачи и проведенный анализ позволяют произвести ее корректную декомпозицию и сформулировать частные задачи.

- обоснование современных требований к достоверности метеоинформации.
- обоснование исходных данных метода классификации опасных метеоявлений в условиях априорной неопределенности.
- разработка метода классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.
- разработка практических рекомендаций по классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности в АМРЛК.

Глава 2 Обоснование исходных данных для классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности

2.1 Проведение экспериментального исследования по регистрации и анализу радиолокационных сигналов от опасных метеоявлений

Проведенный анализ путей оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, показал необходимость использования в критериях классификации ОМЯ информации о высотном распределении отражаемости и турбулентности атмосферы. Для преодоления неопределенности относительно описаний плотностей распределения максимальной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте необходимо провести экспериментальные исследования.

2.1.1 Разработка методики экспериментального исследования формирования базы данных для классификации опасных метеоявлений

С целью получения статистических описаний высотных распределений отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии был проведен анализ таких метеоявлений как ливень, гроза и град, полученных на аэродроме Орловка (Тверская область, Зубцовский район) летом 2021, 2022 гг.

В качестве инструмента получения исходных данных была использована радиолокационная информация, полученная на выходе метеорологического радиолокационного комплекса «Монокль». Рассмотрению было подвергнуто более 100 случаев с радиолокационными наблюдениями за ливнями, грозами и градом.

Для этой задачи была реализована запись «сырого» сигнала с линейного выхода РЛС с возможностью последующего использования специального программного обеспечения (далее — СПО) комплекса. Указанный сигнал записывался при различных синоптических ситуациях, что позволило накопить в дальнейшем статистически значимые данные.

Формирование базы статистических данных в рамках экспериментального исследования осуществляется согласно предложенной методике, схематически изображённой на рисунке 2.1.

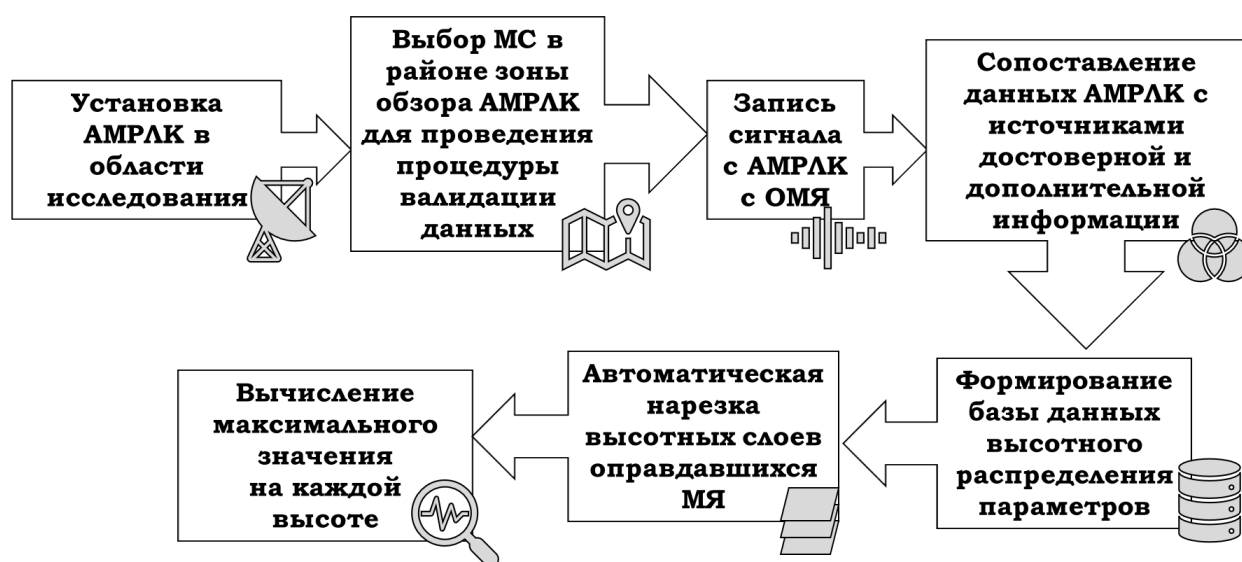


Рисунок 2.1 – Схематическое представление методики формирования базы экспериментальных данных по параметрам МЯ.

1) Размещение Метео-РЛС в исследуемой области. Выбор оптимального мест для размещения АМРАК определяется поставленными задачами и должен соответствовать следующим требованиям:

- обеспечение максимального радиолокационного покрытия территории;
- формирование сплошного радиолокационного метеорологического поля для непрерывного мониторинга за атмосферными явлениями.

2) Выбор метеопостов для проведения валидации данных АМРЛК.

Для проведения процедуры валидации данных, полученных с АМРЛК, используются следующие источники метеорологической информации:

- данные восьмисрочных наблюдений метеостанций (код КН-01/SYNOP), а также оперативные штормовые сообщения по данным наблюдений наземной сети метеостанций (WAREP);
- данные, регистрируемые грозопеленгаторными системами;
- метеорологические карты с информацией о текущих погодных явлениях, карты радиолокационной отражаемости удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR по данным метеорологических радиолокаторов сети Росгидромета;

Основными *достоверными источниками информации* являются данные метеостанций (КН-01, SYNOP, WAREP), а также информация о бортовой погоде, поступающая от экипажей воздушных судов.

В качестве *дополнительных источников информации* используются данные контрольных метеорологических РЛС и информация от грозопеленгаторов.

3) Запись сигналов АМРЛК с ОМЯ. Для этой задачи была реализована запись «сырого» сигнала с линейного выхода РЛС с возможностью последующей настройки специального программного обеспечения комплекса. Указанный сигнал записывался при различных синоптических ситуациях, что позволило накопить в дальнейшем статистически значимые данные для разных климатических зон [63]. При воспроизведении сигнала АМРЛК на индикаторе кругового обзора были получены карты классифицированных метеорологических явлений, радиолокационной отражаемости, удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR.

4) Валидация полученных данных о классифицированных метеорологических явлениях в АМРЛК проводилась путем сопоставления с достоверными метеорологическими источниками: наземными метеорологическими станциями, расположенными в городах Старица, Волоколамск, Можайск и Гагарин и сертифицированными радиолокаторами сети

Росгидромет типа ДМРЛ-С (Рисунок 2.2). Валидации метеорологических явлений предусматривает компаративный анализ информации, представленной на картах АМРЛК и МРЛС, в рамках определённого временного интервала. Верификация явления по карте АМРЛК возможна только при условии его пространственного соответствия аналогичному явлению, отображённому на карте МРЛС. В случае отсутствия такого совпадения явление классифицируется как неподтверждённое.

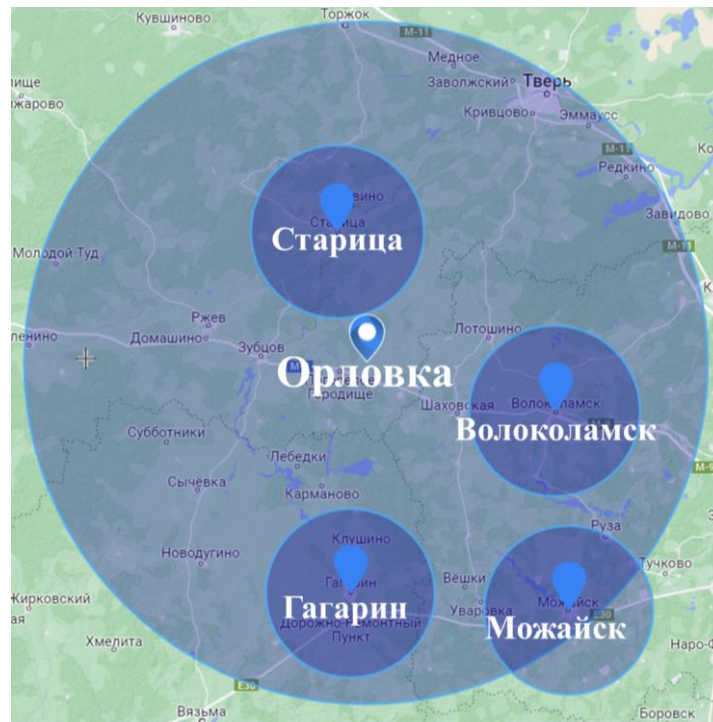


Рисунок 2.2 – Расположение МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения на аэродроме Орловка и МРЛС Внуково, имеющая зону перекрытия с АМРЛК

5) Формирование базы данных оправдавшихся метеоявлений. При оправдавшемся явлении оно было принято и зафиксировано оператором для дальнейшего анализа.

6) Так как Метео-РЛС предварительно формирует 3D-представления всего набора метеоданных, имеется возможность сформировать горизонтальные и вертикальные сечения (срезы) кучево-дождевой облачности с метеоявлениями.

Автоматическое формирование срезов (сечений постоянной высоты) в соответствии с выбранной высотой представлено на рисунках 2.3-2.4.



Рисунок 2.3 – Формирование среза метеоявления

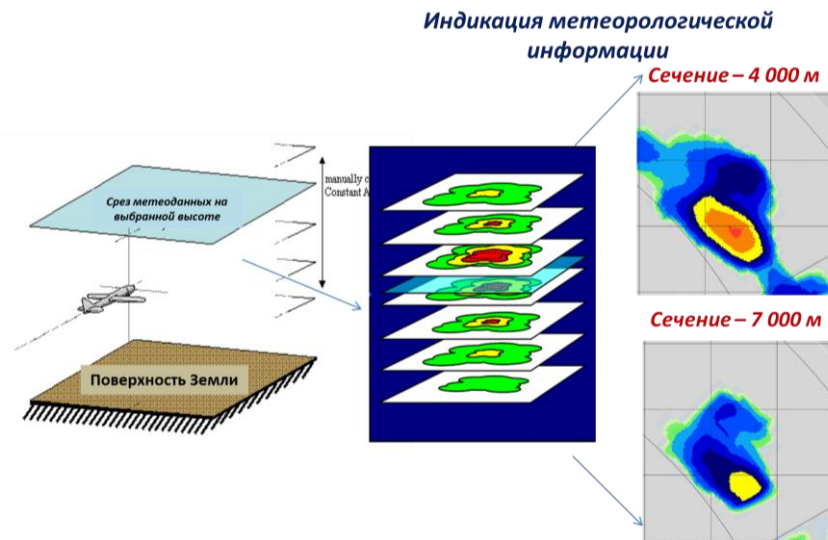
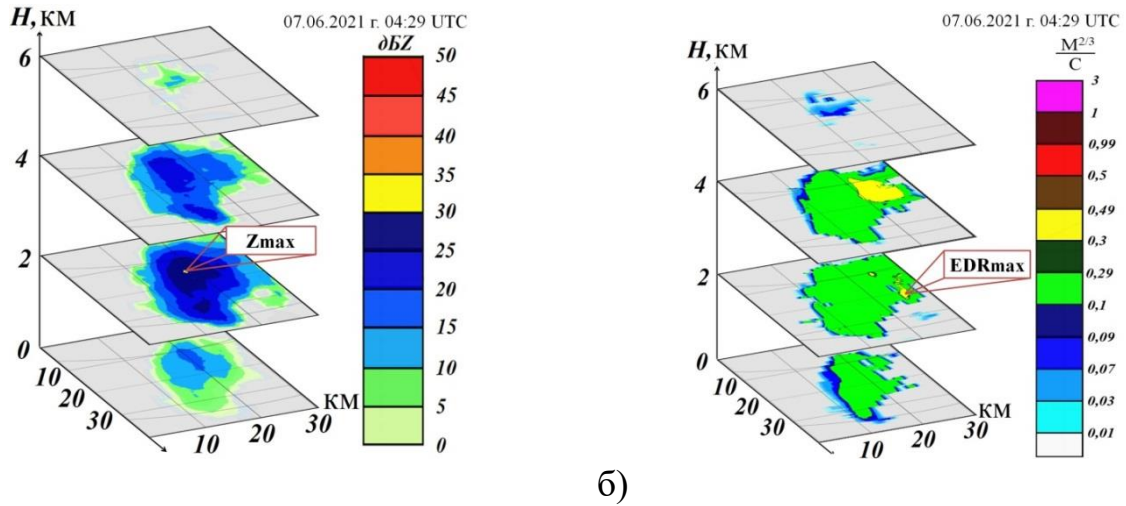


Рисунок 2.4 – Горизонтальные сечения метеоданных при фиксированной высоте

7) Следующим этапом был проведен анализ горизонтального среза КДО. Для получения распределения параметров атмосферы на каждой высоте с дискретом в 1 км были определены значения (рисунок 2.5): максимальной радиолокационной отражаемость в облаке (Z_{\max}), а также максимальное значение EDR в облаке (EDR_{\max}).



а) б)
Рисунок 2.5 – Визуализация пространственного распределения радиолокационной отражаемости и удельной СДТЭ.

На рисунке 2.6 приведён пример первичных данных радиолокационного эхо-сигнала от кучево-дождевой облачности: отображено, как изменяются параметры отражаемости с высотой в условиях ливневых осадков.

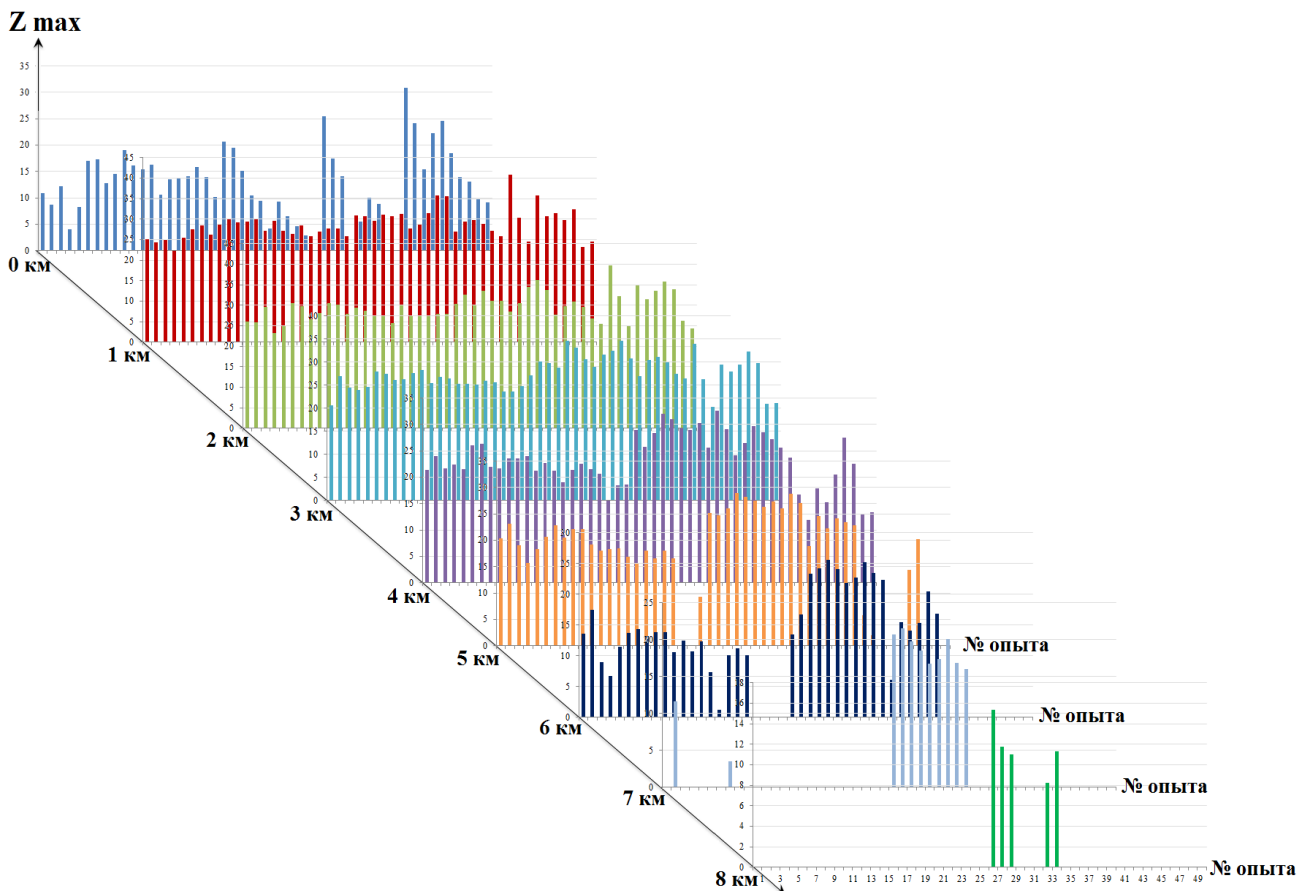


Рисунок 2.6 – Эмпирические данные, демонстрирующие высотное распределение параметров отражаемости, характерное для ливневых осадков.

В результате для каждого разреза кучево-дождевых облаков было найдено распределение отражаемости (Z) и удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR).

Далее необходимо провести статистический анализ полученных экспериментальных данных с учетом географического фактора.

2.1.2 Предварительная обработка экспериментальных данных.

На рисунке 2.7 представлен высотный профиль отражаемости кучево-дождевого облака с ливнем. Необходимо отметить, что АМРЛК осуществляет оценку отражательных и турбулентных характеристик с дискретностью 200 м в пределах 100-километровой зоны. Согласно анализу, представленному на рисунке ниже, максимальная интенсивность радиолокационного отражения в данном наблюдении локализована на высоте приблизительно 2 км и характеризуется ограниченным пространственным охватом. Максимальное зарегистрированное значение отражаемости составило 32 дБZ. В области изотермы нулевой температуры ($H_{0^{\circ}\text{C}}$) значения пиковой отражаемости находятся в интервале 25–29 дБZ.

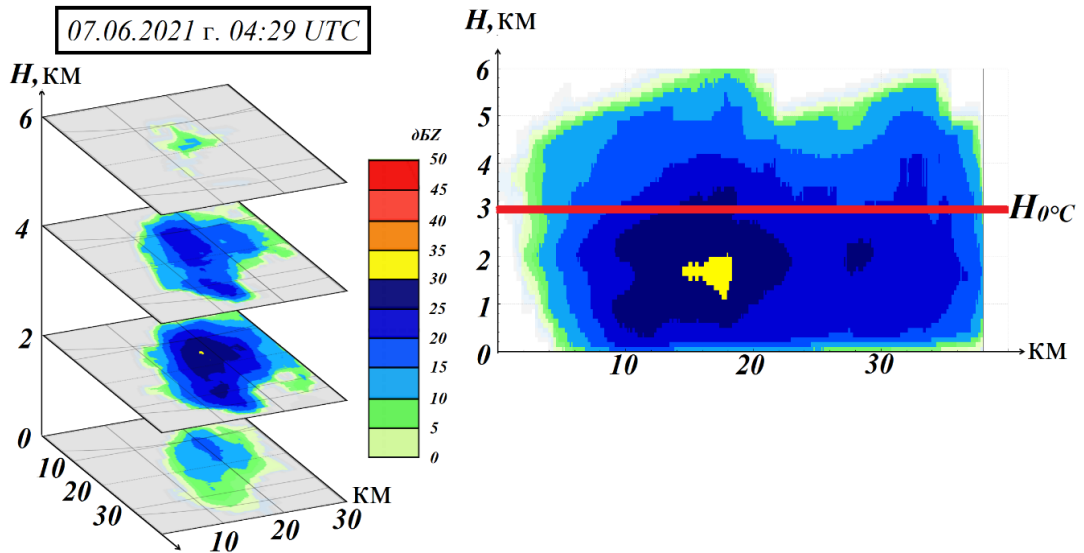


Рисунок 2.7 – Высотный профиль отражаемости в кучево-дождевом облаке с ливнем

На рисунке 2.8 представлена структура пространственного распределения удельной СДТЭ ячейки с ливнем. Максимальное значение турбулентной энергии, наблюдается на высоте около 4 км и равно $0,5 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$, при этом данная область имеет небольшую площадь распространения. В остальной части облака интенсивности турбулентности сохраняется на относительно постоянном уровне.

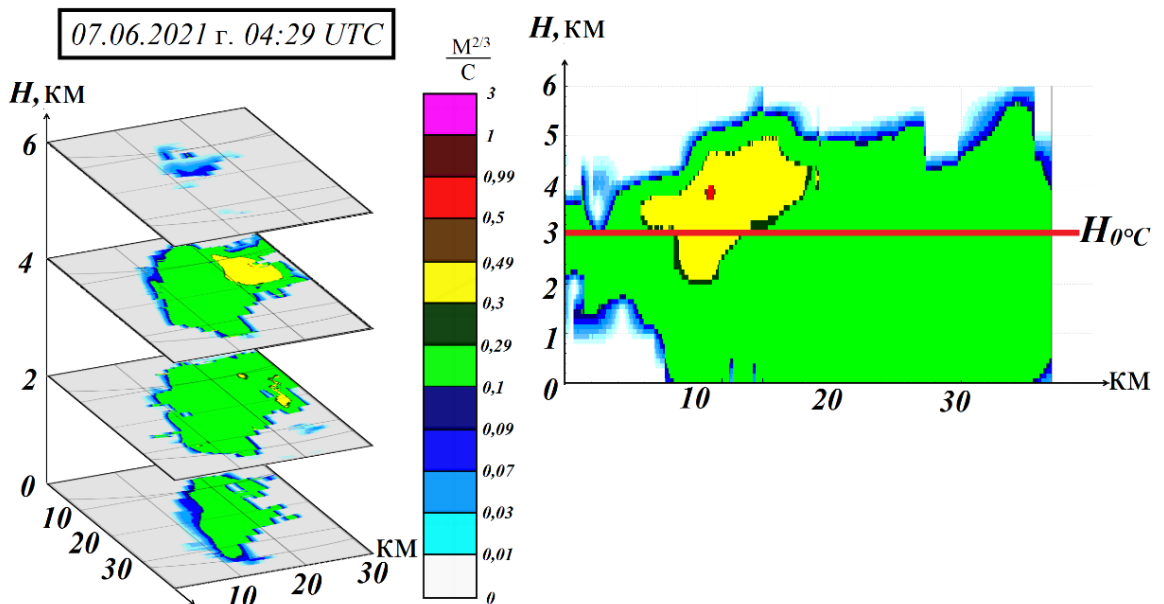


Рисунок 2.8 – Высотный профиль диссипации турбулентной энергии в кучево-дождевом облаке с ливнем

На рисунке 2.9 показаны горизонтальные срезы радиоэха в кучево-дождевом облаке с грозой. Согласно представленным на рисунке 2.9 данным, грозовое облако распространяется по вертикали до высоты 12 км. Наибольшая величина отражаемости (43 дБZ) наблюдается в слое до 7 км. На уровне нулевой изотермы обнаруживаются две отдельные зоны с экстремально высокими показателями отражаемости (выше 45 дБZ). Такая конфигурация указывает на присутствие в облаке конвективных структур, формирующих интенсивные сигналы «ядер» радиоэха.

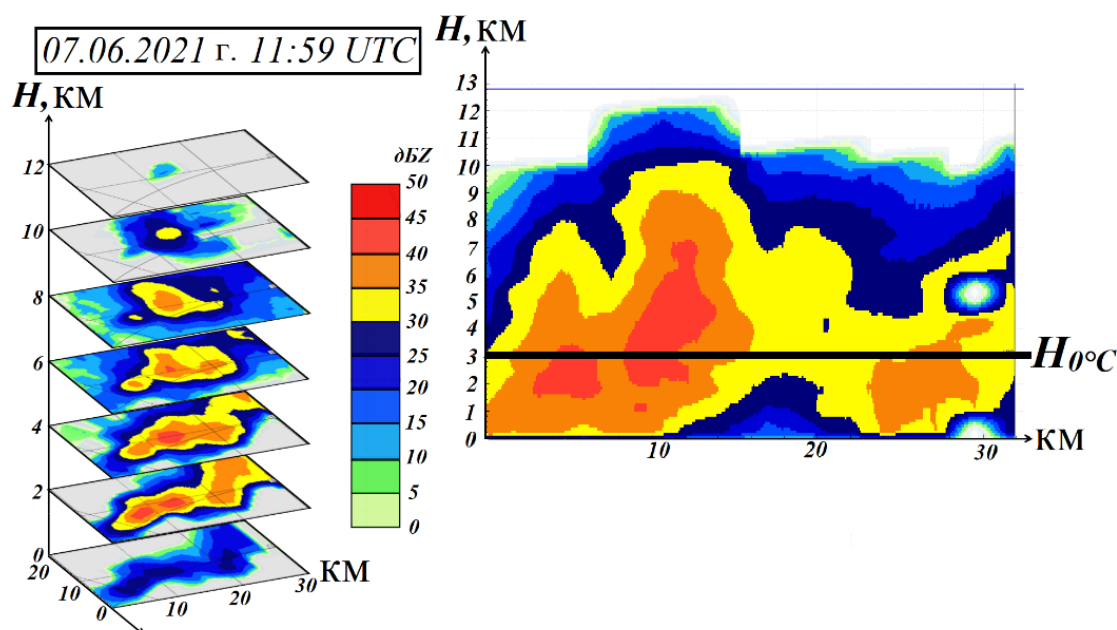


Рисунок 2.9 – Высотный профиль отражаемости в кучево-дождевом облаке с грозой

Максимального значение скорости диссипации турбулентности в грозовом облаке достигает $0,63 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ и простирается от высот 2 км до 12-13 км, имея горизонтальную протяженность в облаке несколько десятков километров (Рисунок 2.10). На уровне нулевой изотермы ($H_{0^\circ\text{C}}$) наблюдается повышенное значение интенсивности турбулентности – $0,56 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$. Этот показатель свидетельствует о преобладании сильной турбулентности в пределах облачной массы.

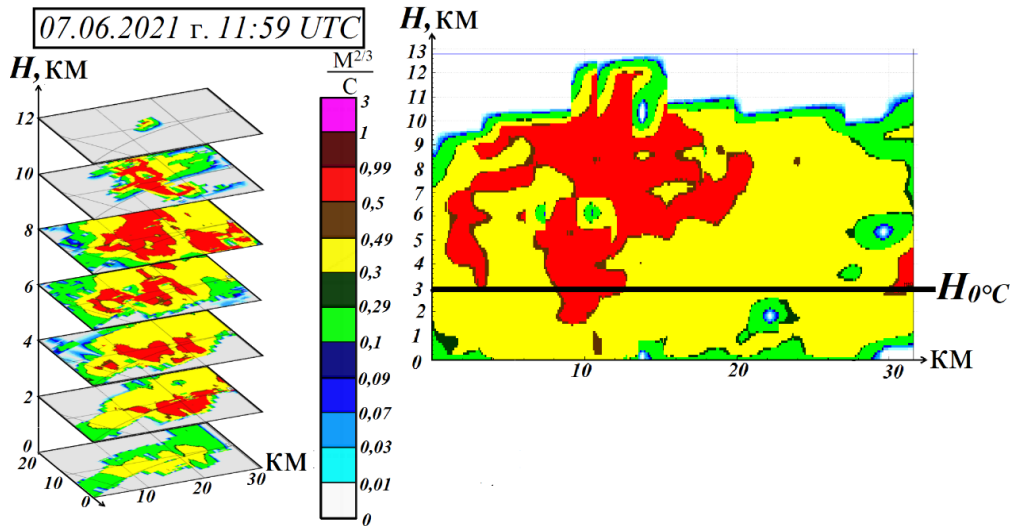


Рисунок 2.10 – Высотный профиль СДТЭ в КДО с грозой

На рисунках 2.11 и 2.12 представлены вертикальные профили интересующих параметров для ячеек с градом. Градовые облака, в отличие от ливневых и грозовых, распространяются до высоты 14 км, однако распределение параметра турбулентности достигает всего 12 км, но имеет максимальную площадь распространения по всей области градового облака. Максимальное значение отражаемости градового облака составляет 50 дБZ и локализовано от 2 до 8 км по высоте.

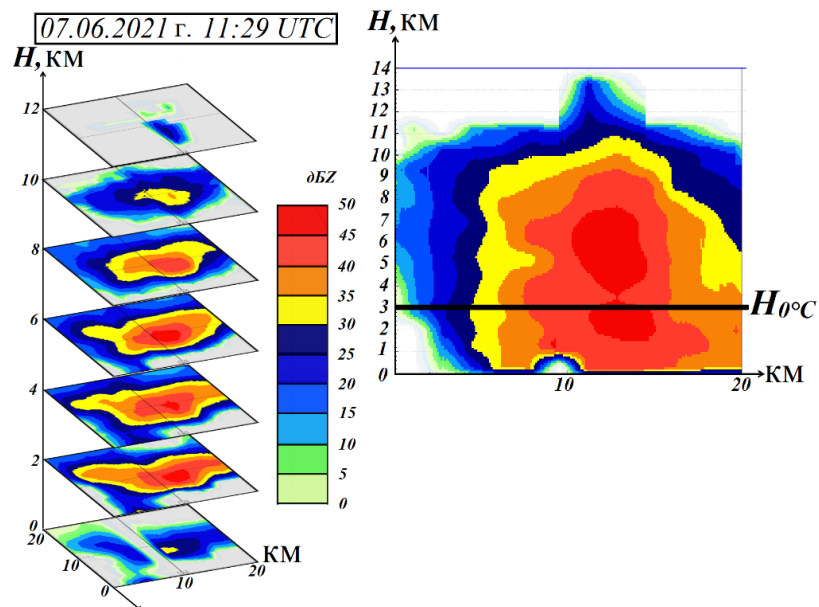


Рисунок 2.11 – Высотный профиль отражаемости в кучево-дождевых облаках с градом

В отличие от пространственного распределения радиолокационной отражаемости, максимум удельной диссипации турбулентной энергии ($0,77 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$) сосредоточен на высоте 9 км. Зона пиковых значений радиолокационной отражаемости, напротив, распространяется до высоты 11 км, при этом её горизонтальная протяжённость заметно превосходит размеры грозовой ячейки.

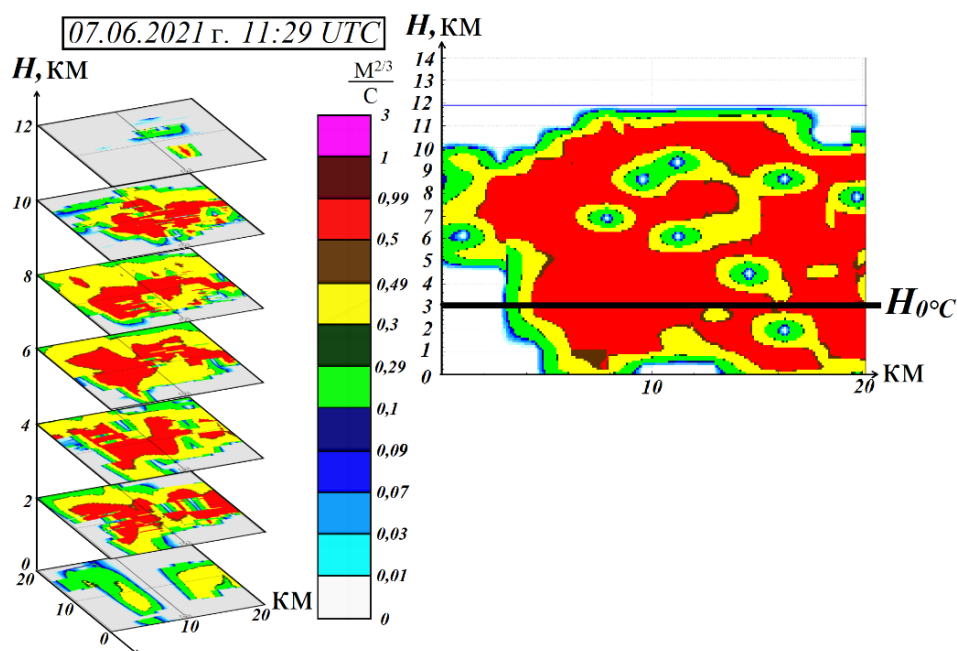


Рисунок 2.12 – Высотный профиль диссипации турбулентной энергии в кучево-дождевом облаке с градом

Из представленных выше рисунков высотного распределения диссипации турбулентной энергии для ливня, грозы и града, мы видим, что полученные нами данные коррелируются с данными, приведенными в различных исследованиях синоптических явлений.

Вывод:

Разработана методика проведения экспериментальных исследований по оценке отражательных и турбулентных характеристик атмосферы для ОМЯ КДО. Проведенный предварительный анализ распределения по высотам максимальных значений отражаемости и турбулентности атмосферы показал, что они имеют характерные особенности для ливней, гроз и града и могут быть использованы для классификации ОМЯ КДО.

2.2 Статистический анализ результатов экспериментальных исследований для обоснования исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень - гроза - град»

2.2.1 Разработка методики статистического анализа экспериментальных данных опасных метеорологических явлений «ливень-гроза-град»

Анализ экспериментальных данных включает несколько основных этапов: оценка параметров распределения эмпирических данных исследования, проверка предположений, лежащих в основе выбранных методов статистического анализа, непосредственно проведение статистического анализа, определение статистической значимости результатов исследования.

Структура методики статистической обработки экспериментальных данных представлена на рисунке 2.13 [62, 65-66].

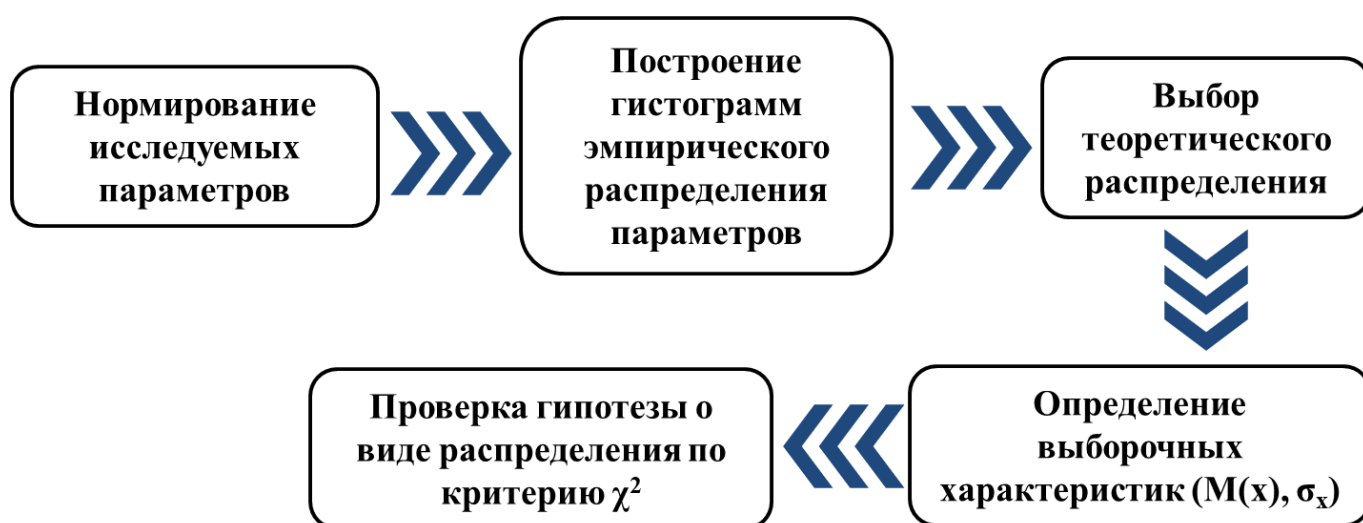


Рисунок 2.13 – Структура методики статистического анализа экспериментальных данных

В качестве исходных данных для статистического анализа были выбраны результаты наблюдений за ливнями, грозой и градом (Приложение Б).

В результате обработки данных получим следующие необходимые параметры:

1. Максимальное значение радиолокационной отражаемости;
2. Максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии.

Первым обязательным этапом анализа параметров является проверка вида закона распределения.

Для определения типа закона распределения, наилучшим образом описывающего имеющиеся данные, проводится анализ гистограммы распределения, рассчитываются коэффициенты асимметрии и эксцесса. На основании визуального сходства гистограммы с известными распределениями, а также близости полученных значений коэффициентов к их теоретическим значениям, выбирается наиболее подходящий закон распределения, параметры которого затем подвергаются оценке.

Поскольку все данные однородны (все ряды ведут себя примерно одинаково), выполняется усреднение по опытам, т.е. складываются все значения параметров для каждой высоты и делится на общее количество полученных наблюдений. Сумма этих экспериментальных относительных частот равна единице. Далее задаются центры интервалов, необходимые для построения графика гистограммы. По исходным данным строим гистограммы относительных частот.

После выбора подходящего вида распределения производится оценка его параметров. Определяются выборочные характеристики, как минимум вычисляется выборочное среднее и выборочное СКО. Поскольку эксперимент не подразумевает попадание/непопадание каких-либо результатов опытов в разные интервалы, для нахождения характеристик используем формулы для вычисления характеристик дискретных случайных величин. (формула (11) для МО и формула (12) для дисперсии в [67])

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (11)$$

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 p_i, \quad (12)$$

Где, p_i — это, по сути, эмпирические отнормированные частоты;

x_i — значения высоты;

$x_i \cdot p_i$ — произведение эмпирических частот и значения высоты;

a - произведения эмпирических частот и значения высоты

просуммированы по всем интервалам высоты, получаем выборочное среднее.

Выборочное СКО (формула 13) вычисляем как корень из дисперсии:

$$\sigma_x = \sqrt{D(x)}, \quad (13)$$

Применительно к выбранному закону распределения проводится проверка статистической гипотезы о том, что имеющиеся данные подчиняются этому закону. Если гипотеза подтверждается, аппроксимация считается удовлетворительной. В противном случае рассматриваются альтернативные варианты: корректировка оценок параметров распределения, выбор другого типа закона, либо увеличение объема выборки за счет продолжения наблюдений. Следует отметить, что предложенный подход не обеспечивает гарантии нахождения оптимального закона распределения, а лишь позволяет приблизиться к адекватному описанию данных.

На рисунке 2.14 проиллюстрирована гистограмма, отображающая распределение относительных частот для показателя $H(Z_{\max})$.

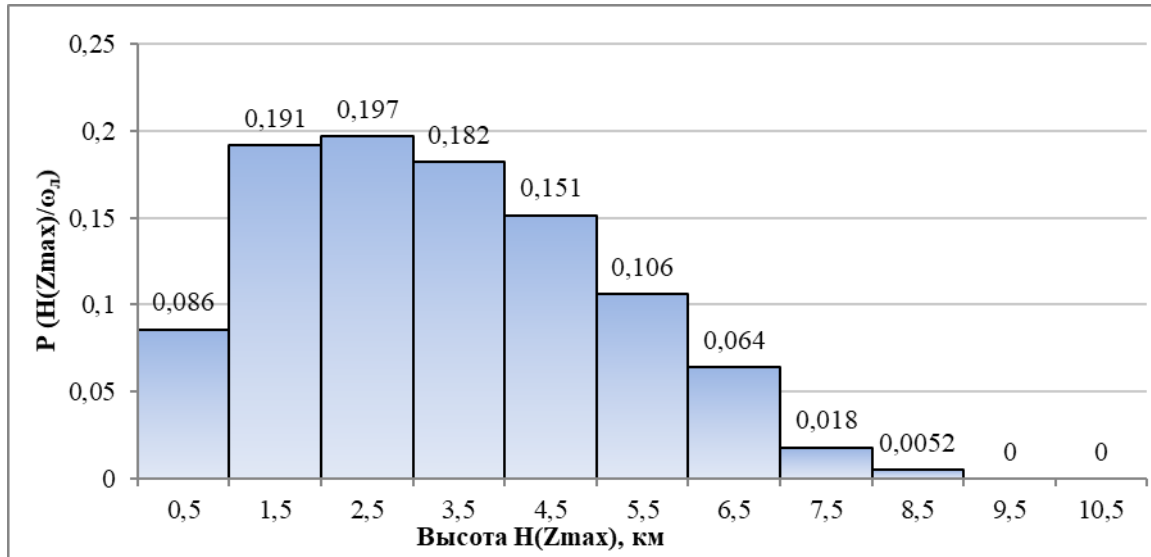


Рисунок 2.14 – Гистограмма распределения относительных частот для H(Zmax).

По приведенной выше методике были проверены гипотезы о том, что искомое распределение подчиняется логнормальному закону распределения, распределению Вейбула, Рэля и бетта-распределению, но выбранные теоретические законы плохо согласовывались с опытными данными и были отвергнуты.

Проверка различных гипотез о виде распределений по критерию согласия χ^2 Пирсона для уровня значимости 0.01 показала максимальное соответствие экспериментальных относительных частот обобщенному распределению Рэля – Райса

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x \cdot \mu}{\sigma^2}\right), \quad (14)$$

где $I_0(z)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $\mu = 2$ - МО и $\sigma = 2.5$ – СКО.

На рисунке 2.15 показан результат аппроксимации гистограммы теоретическим законом. Параметры μ и σ в строгом смысле не являются МО и СКО, однако соответствующим образом отражают форму распределения [67-69].

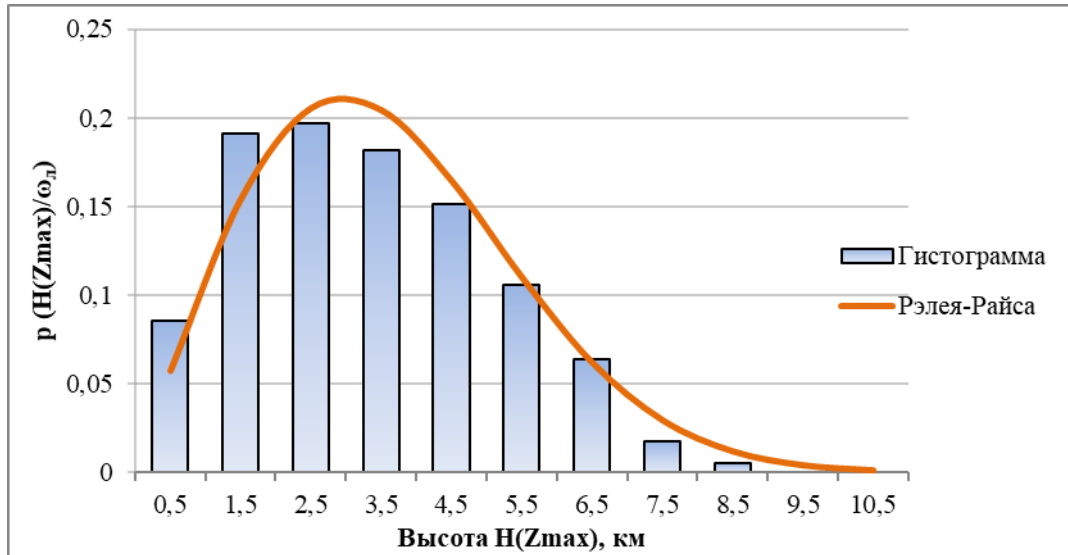


Рисунок 2.15 – Аппроксимация гистограммы данных с использованием теоретического распределения Райса.

Статистический анализ параметра $H(EDR_{max})$ для ливневых осадков проводился согласно предложенной методике. Аналогично, были изучены амплитудные распределения Z_{max} и EDR_{max} для гроз и града. Выявлено, что результаты анализа соответствуют распределению Райса. Для иллюстрации этих закономерностей, на рисунках 2.16 и 2.17 представлены графики параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , характеризующих рассматриваемые метеорологические явления.

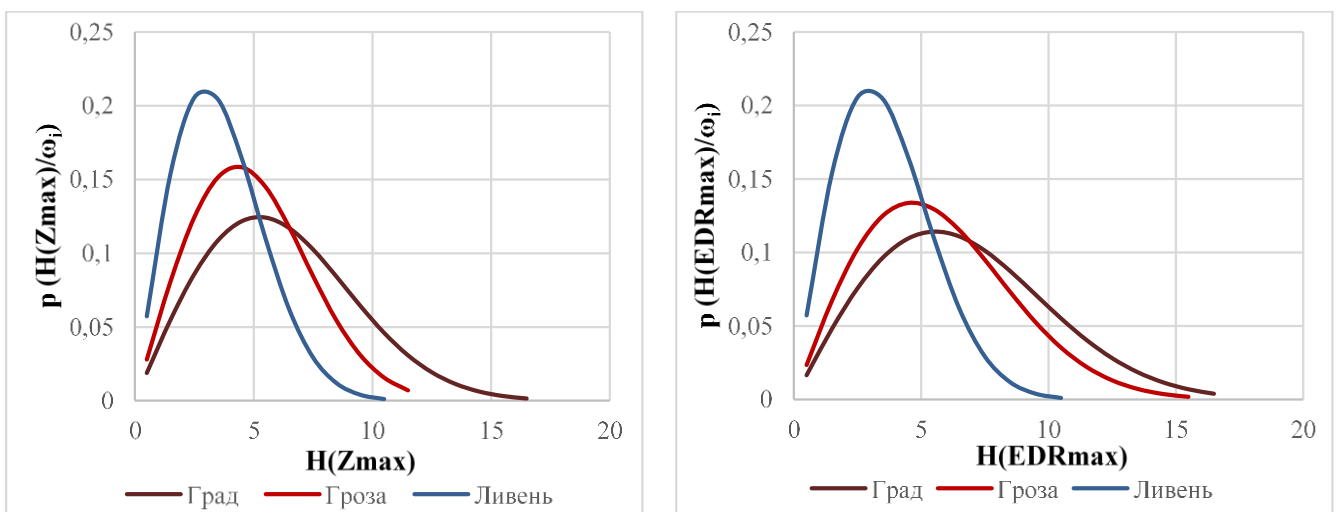


Рисунок 2.16 – Плотность распределения вероятности Z_{max} и EDR_{max} по высоте для рассматриваемых метеоявлений

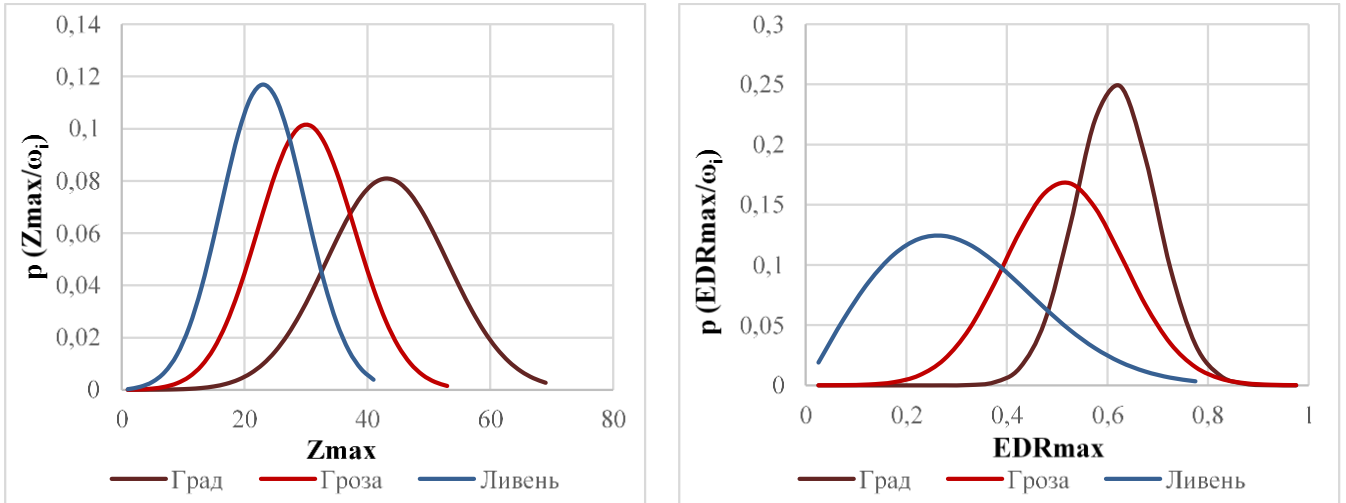


Рисунок 2.17 – Плотность распределения вероятности Z_{\max} и EDR_{\max} по значениям для рассматриваемых метеоявлений

В Таблице 13 приведены параметры μ и σ_x распределения Райса, рассчитанные на основе вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности для ливней, гроз и градов. Таким образом, данная таблица служит параметрической основой для классификации этих метеорологических явлений.

Таблица 13 – Параметры распределения Райса для ливня, грозы и града

Параметр	Ливень	Гроза	Град
	H(Z_{\max})		
МО	$\mu = 2$	$\mu = 3,5$	$\mu = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 3$	$\sigma_x = 4$
H(EDR_{\max})			
МО	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 4$	$\sigma_x = 4,5$
Z_{\max}			
МО	$\mu = 22$	$\mu = 29$	$\mu = 42$
СКО	$\sigma_x = 7$	$\sigma_x = 8$	$\sigma_x = 10$
EDR_{\max}			
МО	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.61$
СКО	$\sigma_x = 0.2$	$\sigma_x = 0.12$	$\sigma_x = 0.08$

Вывод:

Таким образом, статистический анализ данных натурального эксперимента показал, что плотности распределения максимальной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте имеют уникальный параметрический характер, описываемый обобщенным законом Райса.

Структура классификации опасных метеорологических явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью на основании радиолокационных наблюдений, должна быть представлена в виде решения следующих взаимосвязанных задач:

- формирование алфавита классов, в рассматриваемом случае это: «ливень – гроза – град»;
- выбор априорного признакового пространства в виде максимальных значений отражаемости Z_{\max} и турбулентности EDR_{\max} , а также их распределения по высотам $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$;
- формирование вероятностного описания признаков в виде плотностей распределения вероятностей информационных параметров $p(Z_{\max}/\omega_i)$, $p(EDR_{\max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{\max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{\max})/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$;
- разработка алгоритмов классификации с различными комбинациями признаков и определением порогов принятия решений в соответствии с критерием максимального правдоподобия, исходя из требуемой достоверности классификации.

2.2.2 Обоснование исходных данных для алгоритмов классификации

Достоверное распознавание ОМЯ КДО требует определения наиболее информативных параметров, описывающих образы рассматриваемых явлений.

Задача оптимизации признакового пространства является фундаментальной в теории распознавания образов и заключается в минимизации количества признаков, обеспечивающих максимальную информативность применительно к рассматриваемой системе распознавания.

В качестве метода выбора информативных признаков предложен статистический анализ их распределений. Первым этапом является построение эмпирических распределений вероятностей признаков с последующей идентификацией типа распределения [67, 70-72]. В частности, в работе [74] экспериментально получены распределения максимальной отражаемости $p(Zmax/\omega_i)$, максимальной удельной СДТЭ (турбулентности атмосферы) $p(EDRmax/\omega_i)$, и их высотные профили в виде $p(H(Zmax)/\omega_i)$ и $p(H(EDRmax)/\omega_i)$ для различных классов ОМЯ, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$. Анализ формы распределений с использованием критерия χ^2 Пирсона (уровень значимости 0.01) показал, что они хорошо аппроксимируются обобщенным распределением Рэлея – Райса.

$$p(x_i, \mu_i, \sigma_i) = \frac{x_i}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x_i^2 + \mu_i^2)}{2\sigma_i^2}\right) I_0\left(\frac{x_i \mu_i}{\sigma_i^2}\right), \quad (15)$$

где $I_0(z)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Параметры μ и σ в строгом смысле не являются классическими определениями математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, однако соответствующим образом отражают форму распределения. Полученные в ходе проведения экспериментального исследования результаты были использованы в качестве исходных данных для последующей разработки алгоритмов классификации ОМЯ – ливней, гроз и града.

Следующим этапом является анализ информативности признаков классификации и их влияния на достоверность принятия решений. В качестве критерия приемлемой достоверности принимается вероятность правильной классификации не ниже 0.8.

Вывод:

Статистический анализ данных, полученных в ходе проведения натурного эксперимента, выявил, что плотности распределения максимальных значений радиолокационной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте имеют уникальный параметрический характер, описываемый обобщенным законом Райса. Априорная параметрическая неопределенность преодолена.

Выводы по 2 главе:

1. На основании разработанной методики проведены экспериментальные исследования по регистрации и анализу радиолокационных сигналов, отраженных от реальных опасных метеоявлений в весенне-осенний период для формирования обучающей выборки. Эксперимент проводился в период 2021 и 2022 г. на аэродроме Орловка (КТА 56.141871 СШ, 34.988622 ВД) с использованием АМРЛК «Монокль». Для каждого ОМЯ было проанализировано 50 подтвержденных случаев.

2. Проведенный первичный анализ рассматриваемых случаев распределения по высотам отражательных и турбулентных характеристик атмосферы показал возможность их использования при классификации метеоявлений.

3. Разработана методика статистической обработки экспериментальных данных. Проведенный статистический анализ натуральных данных позволил установить, что плотности распределения максимальных значений радиолокационной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте имеют уникальный параметрический характер, описываемый обобщенным законом Райса. Исходные данные для метода классификации ОМЯ КДО получены в виде оценок

математического ожидания и СКО для плотностей распределения $p(Z_{\max}/\omega_i)$, $p(EDR_{\max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{\max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{\max})/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$.

Глава 3 Байесовский метод классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы

3.1 Разработка структуры метода классификации ОМЯ КДО

Метод классификации опасных метеорологических явлений (Рисунок 3.1), связанных с кучево-дождевой облачностью на основании радиолокационных наблюдений, представляется в виде решения взаимосвязанных задач.

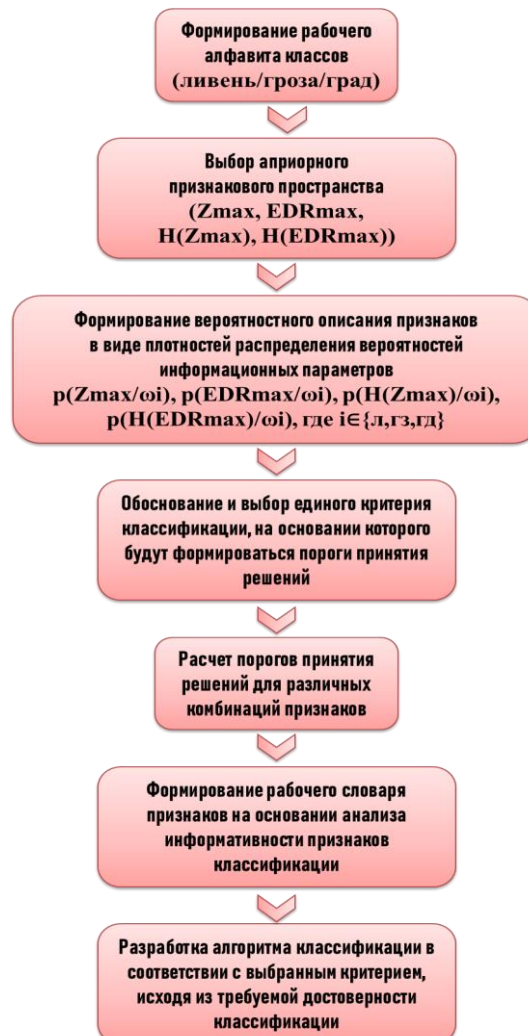


Рисунок 3.1 – Структура метода классификации

При строгой постановке задачи классификации формирование полной группы событий предполагает наличие в алфавите класса «другое событие». В контексте данного исследования метеоявление «сильный дождь» классифицируется как низкоуровневая угроза и, по сути, не являющееся опасным, тогда как «смерч», будучи значительно более опасным, крайне редко наблюдается в умеренных широтах Европейской территории России. Последние допущения определяют пределы интегрирования при расчете соответствующих вероятностей принятия решений, как это будет показано ниже. Кроме того, на данном этапе исследований примем допущение о независимости признаков, что серьезно упростит решение задачи без существенного влияния на результат.

Для оптимизации процесса классификации необходимо рассчитать пороговые значения, позволяющие принимать решения для различных комбинаций признаков при заданном критерии классификации – максимума правдоподобия [60, 71] для экспериментально определенной плотности распределения информационных параметров [75].

В соответствии с данным критерием классификации ОМЯ для альтернативы $i, k; i \neq k, i \in \{л, гз, гд\}$ осуществляется в соответствии со значением порога, определяемого решением уравнения

$$h_{\text{пор}}(i, k) = \frac{x}{\sigma_i^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_i^2}{2 * \sigma_i^2}} I_0\left(\frac{x * \mu_i}{\sigma_i^2}\right) - \frac{x}{\sigma_k^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_k^2}{2 * \sigma_k^2}} I_0\left(\frac{x * \mu_k}{\sigma_k^2}\right) = 0, \quad (16)$$

Таким образом, для каждого априорного признака может быть сформирована полная матрица вероятностей классификации:

$$P(x) = \begin{vmatrix} P_{лл}(x) & P_{лгз}(x) & P_{лгд}(x) \\ P_{гзл}(x) & P_{гзгз}(x) & P_{гзгд}(x) \\ P_{гдл}(x) & P_{гдгз}(x) & P_{гдгд}(x) \end{vmatrix}, \quad (17)$$

элементы которой вычисляются как:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Л,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, л) dx; \\ P_{Л,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, л) dx; \\ P_{Л,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, л) dx; \\ P_{ГЗ,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, гз) dx; \\ P_{ГЗ,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, гз) dx; , \\ P_{ГЗ,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, гз) dx; \\ P_{ГД,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, гд) dx; \\ P_{ГД,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, гд) dx; \\ P_{ГД,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, гд) dx. \end{array} \right. \quad (18)$$

где достоверность принятия правильных решений определяется диагональными элементами матрицы. Несмотря на некоторую некорректность применения пределов интегрирования от 0 до бесконечности, ограниченный рабочий алфавит классов позволяет считать такую постановку задачи допустимой.

Велика вероятность того, что заданная достоверность классификации может быть достигнута при совместном использовании признаков в правилах принятия решений в виде многомерных плотностей распределения вероятностей. Для принятого допущения о статистической независимости признаков их n -мерная плотность распределения вероятностей имеет вид

$$p(x_1, \mu_1, \sigma_1, x_2, \mu_2, \sigma_2, \dots, x_n, \mu_n, \sigma_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i) \quad (19)$$

где $p(x_i, \mu_i, \sigma_i)$ определена в виде (15). А расчет порогов принятия решений производится решением уравнений вида

$$\prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i) - \prod_{k=1}^n p(x_k, \mu_k, \sigma_k) = 0 \quad (20)$$

3.2 Разработка алгоритма классификации опасных метеоявлений на основе рабочего словаря признаков

3.2.1 Оценка информативности признаков классификации опасных метеоявлений

В контексте достоверного распознавания ОМЯ КДО первостепенное значение приобретает задача определение наиболее информативных признаков, которые наилучшим образом описывают рассматриваемые метеоявления. Определение оптимального набора признаков является фундаментальной и критически важной задачей в рамках теории распознавания образов, которая заключается в нахождении минимального количества признаков, наиболее информативно описывающих образы в данной системе (или задаче) распознавания (Приложение В).

Для формирования рабочего словаря признаков проанализируем их информативность при решении задачи классификации ОМЯ КДО.

Примером решения пары уравнений для плотностей распределения вероятностей $p(Z_{max}/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$ (рисунок 3.2) является формирование пары порогов: $h_{\text{л,гз}}(Z_{max}) = 27.4 \text{ дБЗ}$; $h_{\text{гз,гд}}(Z_{max}) = 37.2 \text{ дБЗ}$.

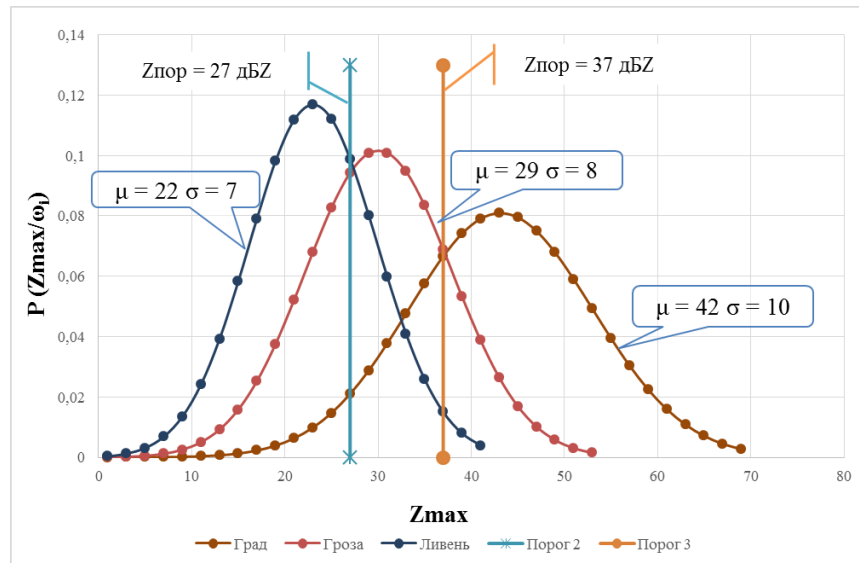


Рисунок 3.2 – Пороги принятия решений для параметра Z_{max}

$$P(Z_{max}) = \begin{vmatrix} 0,715 & 0,263 & 0,022 \\ 0,347 & 0,463 & 0,19 \\ 0,05 & 0,218 & 0,732 \end{vmatrix} \quad (21)$$

В (21) при недостаточных величинах вероятностей правильной классификации наблюдаются высокие вероятности перепутывания, особенно в случае грозы. Для признака $H(Z_{max})$ (рисунок 3.3) пороги принятия решений имеют значения $h_{\text{л,гз}}(H(Z_{max})) = 4.63 \text{ км}$; $h_{\text{гз,гд}}(H(Z_{max})) = 6.53 \text{ км}$.

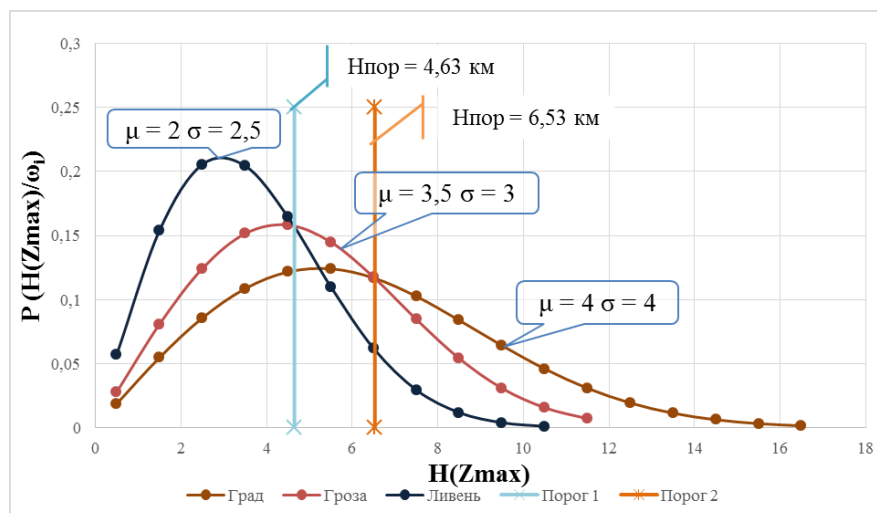


Рисунок 3.3 – Пороги принятия решений для параметра $H(Z_{max})$

Высокая площадь перекрытия кривых проявляется в неприемлемых значениях элементов всей матрицы классификации, каждого в своем качестве.

$$P(H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,759} & 0,153 & 0,088 \\ 0,518 & \mathbf{0,205} & 0,277 \\ 0,374 & 0,177 & \mathbf{0,449} \end{vmatrix} \quad (22)$$

Практически аналогичная картина наблюдается для признака $H(EDRmax)$, где пороги имеют значения: $h_{л,гз}(EDRmax) = 5.09$ км; $h_{гз,гд}(H(EDRmax)) = 6.89$ км

$$P(H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,791} & 0,156 & 0,053 \\ 0,463 & \mathbf{0,220} & 0,317 \\ 0,359 & 0,208 & \mathbf{0,433} \end{vmatrix} \quad (23)$$

Не намного лучше ситуация складывается для признака $EDRmax$ (рисунок 3.4), где пороги равны $h_{л,гз}(EDRmax) = 0.39$ м^{2/3}с⁻¹; $h_{гз,гд}H(EDRmax) = 0.54$ м^{2/3}с⁻¹. В случае с грозой достоверность принятия решений опять неприемлема.

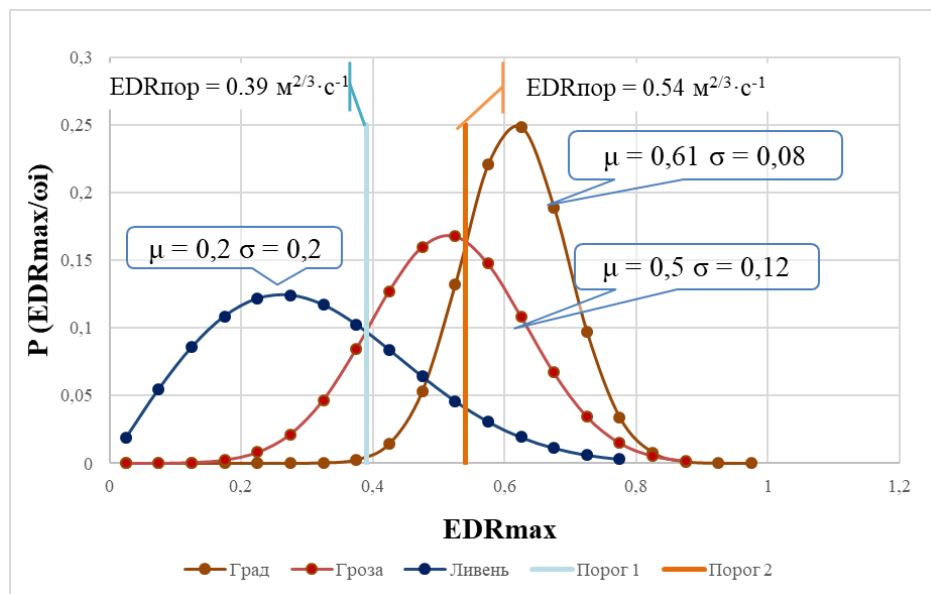


Рисунок 3.4 – Пороги принятия решений для параметра EDRmax

$$P(EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,712} & 0,205 & 0,083 \\ 0,146 & \mathbf{0,440} & 0,414 \\ 0,002 & 0,170 & \mathbf{0,828} \end{vmatrix} \quad (24)$$

Таким образом, наименее информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Большой разделяющей способностью обладают признаки Z_{max} , EDR_{max} , однако и для них достоверность классификации гроз остается неприемлемо низкой.

Для повышения достоверности классификации метеоявлений в заданном алфавите классов необходимо совместное использование признаков, например, в виде многомерных плотностей распределения вероятностей случайных информационных параметров Z_{max} , EDR_{max} , $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$.

Рисунки 3.5 и 3.6 демонстрируют двумерные плотности распределения $p(Z_{max}, H(Z_{max})/\omega_i)$ и $p(EDR_{max}, H(EDR_{max})/\omega_i)$ соответственно.

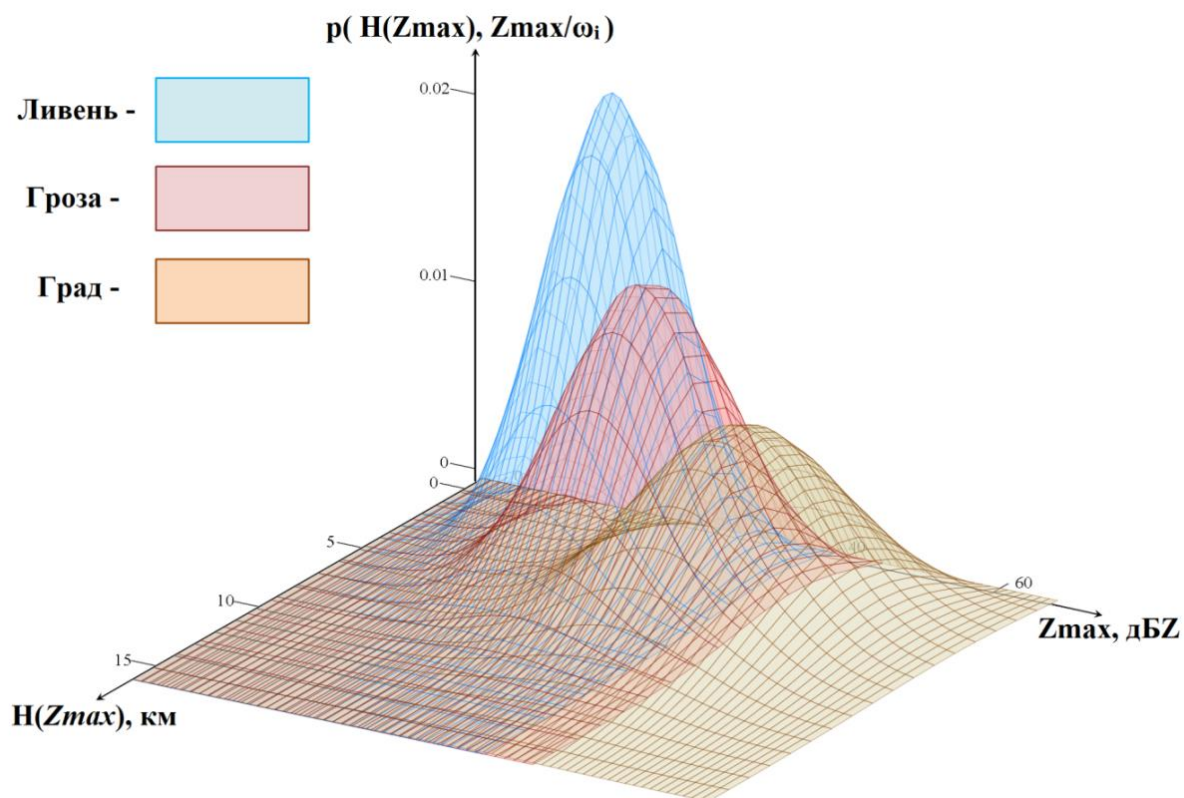


Рисунок 3.5 – Поверхность двумерной плотности вероятности радиолокационной отражаемости

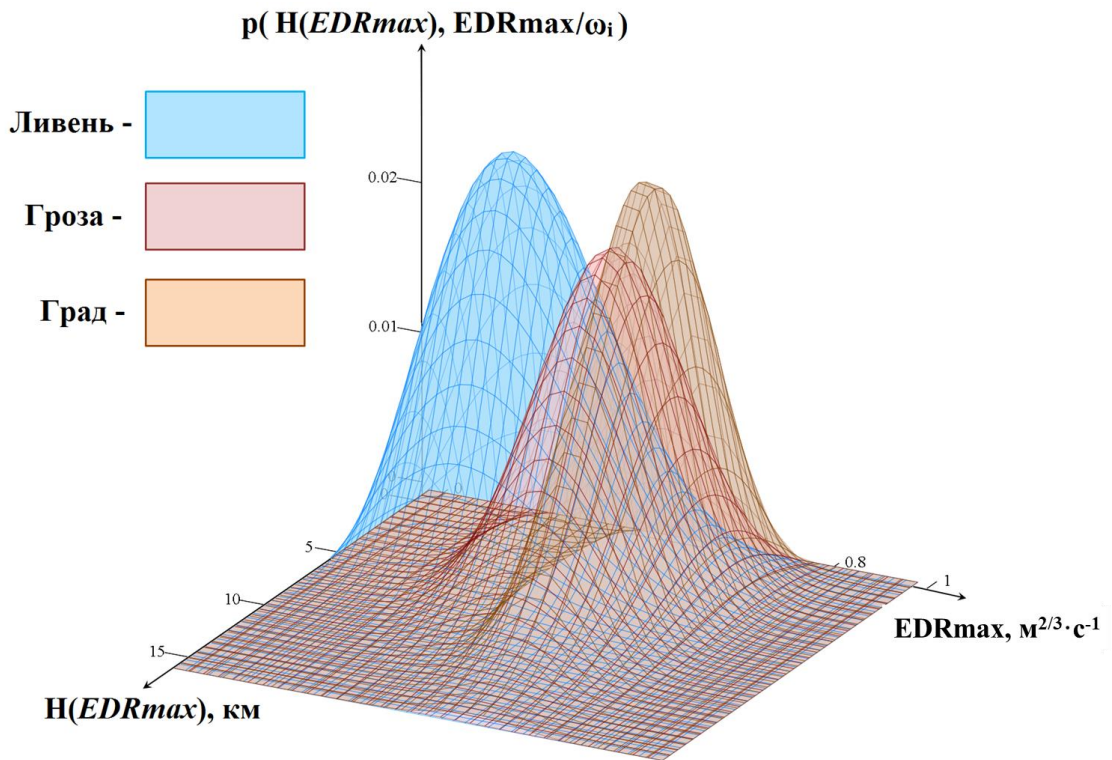


Рисунок 3.6 – Поверхность двумерной плотности вероятности EDR

Пороги для двумерных случаев, полученные численным методом [71, 73], представляют собой плоскость, пересечение которой с плоскостью OXY для рассматриваемых примеров представлены в виде кривых на рисунках 3.7 и 3.8.

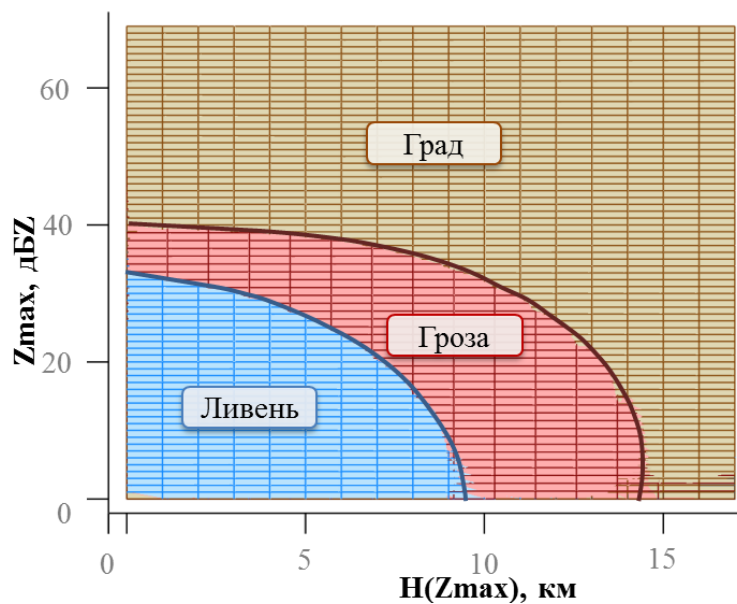


Рисунок 3.7 – Проекция разделяющей плоскости на горизонтальную плоскость для $p(H(Zmax), Zmax/\omega_i)$

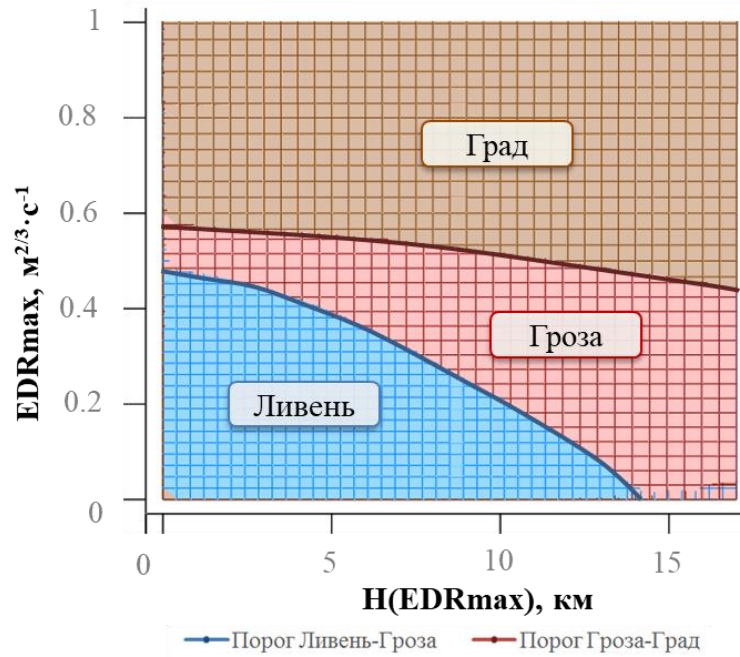


Рисунок 3.8 – Проекция разделяющей плоскости на горизонтальную плоскость для $p(H(EDR_{max}), EDR_{max}/\omega_i)$

Матрицы вероятностей, соответствующие данным признакам, представлены следующим образом:

$$P(Z_{max}, H(Z_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,753} & 0,243 & 0,004 \\ 0,320 & \mathbf{0,505} & 0,175 \\ 0,040 & 0,216 & \mathbf{0,744} \end{vmatrix} \quad (25)$$

$$P(EDR_{max}, H(EDR_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,761} & 0,175 & 0,064 \\ 0,146 & \mathbf{0,463} & 0,391 \\ 0,003 & 0,181 & \mathbf{0,816} \end{vmatrix} \quad (26)$$

В случае наиболее информативных признаков, Z_{max} и EDR_{max} , матрица принимает форму

$$P(Z_{max}, EDR_{max}) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,769} & 0,161 & 0,070 \\ 0,141 & \mathbf{0,683} & 0,176 \\ 0,031 & 0,159 & \mathbf{0,810} \end{vmatrix} \quad (27)$$

Матрица (27) ожидаемо имеет лучшие показатели по достоверности классификации. Проанализируем рост этого показателя с увеличением размерности решаемой задачи. Получим

$$P(Zmax, H(Zmax), H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,809} & 0,174 & 0,017 \\ 0,231 & \mathbf{0,553} & 0,216 \\ 0,075 & 0,173 & \mathbf{0,752} \end{vmatrix} \quad (28)$$

$$P(EDRmax, H(EDRmax), H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,788} & 0,146 & 0,066 \\ 0,251 & \mathbf{0,497} & 0,252 \\ 0,049 & 0,144 & \mathbf{0,807} \end{vmatrix} \quad (29)$$

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,800} & 0,195 & 0,005 \\ 0,162 & \mathbf{0,691} & 0,147 \\ 0,024 & 0,159 & \mathbf{0,817} \end{vmatrix} \quad (30)$$

И наконец,

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax, H(EDRamx)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,839} & 0,138 & 0,023 \\ 0,145 & \mathbf{0,701} & 0,154 \\ 0,022 & 0,157 & \mathbf{0,821} \end{vmatrix} \quad (31)$$

В матрице вероятностей (31), как и ожидалось, достигнуты максимальные значения вероятностей правильной классификации. Ниже требуемого уровня лишь достоверность классификации грозы. Однако, при практической реализации возможно некоторое снижение порога $h_{л,гз}$ с учетом большей опасности грозы, либо одновременное «расширение» порогов $h_{л,гз}$ и $h_{гз,гд}$ для выравнивания достоверностей для всех классов.

На рисунках 3.9 – 3.11 показаны суммарные значения и относительный прирост вероятностей правильной классификации для ливня, грозы и града соответственно при различной номенклатуре и количестве используемых признаков. В случае с ливнем прирост от одномерной задачи к четырехмерной составил всего 13.5%. Почти приемлемые достоверности для ливня наблюдались уже в двумерных вариантах. Для грозы общий прирост составил 100%. Однако, даже в четырехмерном варианте приемлемая достоверность классификации не достигнута. Наибольшей информативностью обладают признаки $Zmax$ и $EDRmax$. Распределение данных параметров по высотам коррелировано, а потому менее информативно. Суммарный процент прироста достоверности принятия решений при переходе задач в виде «одномерные – двумерные» – 30,22%, «одномерные – трехмерные» – 34,6%, «одномерные – четырехмерные» – 49,3%. Это подтверждает

необходимость увеличения признакового пространства в рассматриваемом случае при учете известного «проклятия размерности» [58].

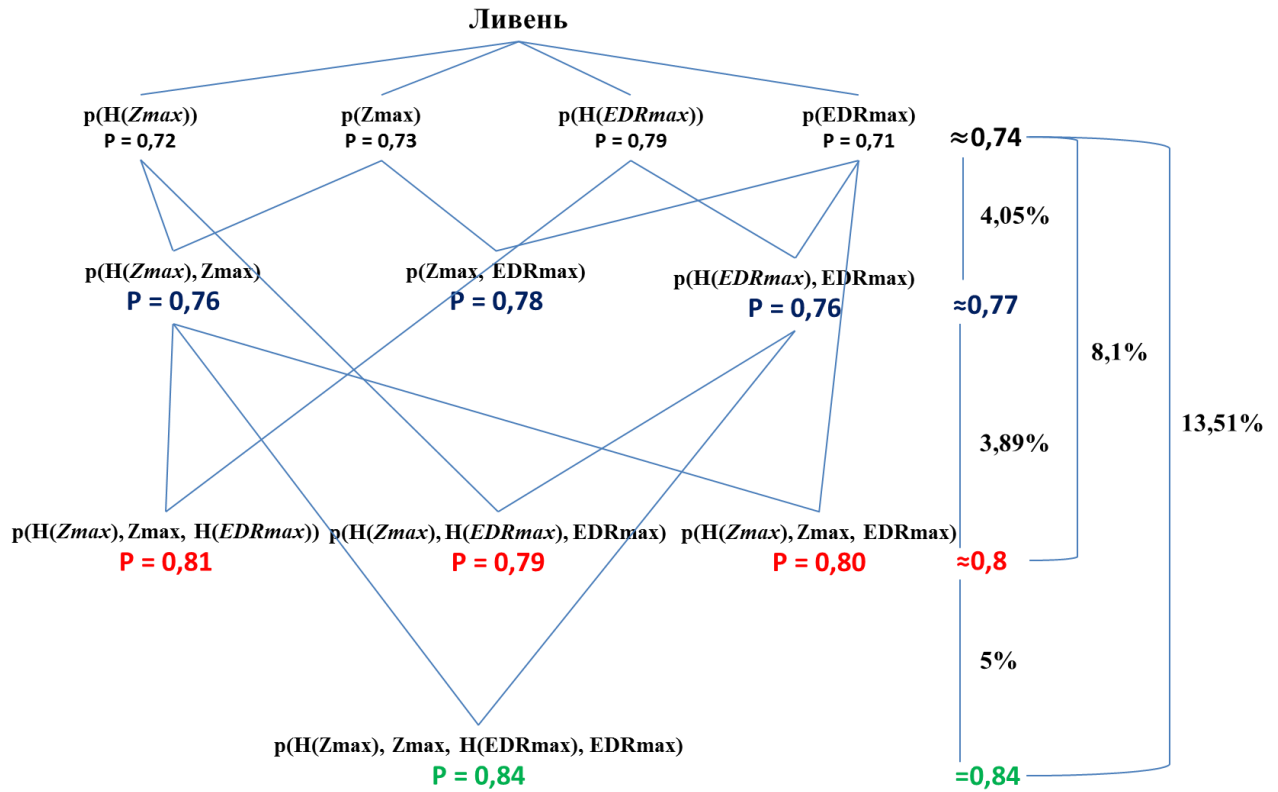


Рисунок 3.9 – Относительный прирост достоверности классификации ливня при увеличении числа признаков

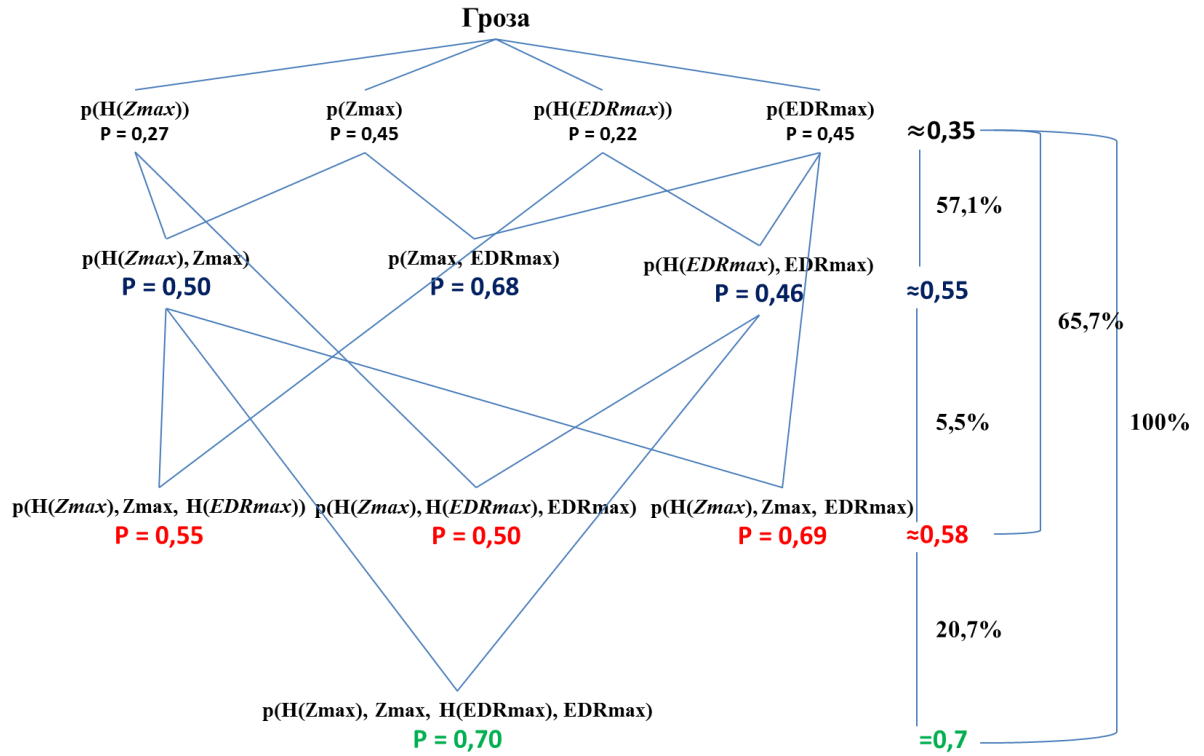


Рисунок 3.10 – Относительный прирост достоверности классификации грозы при увеличении числа признаков

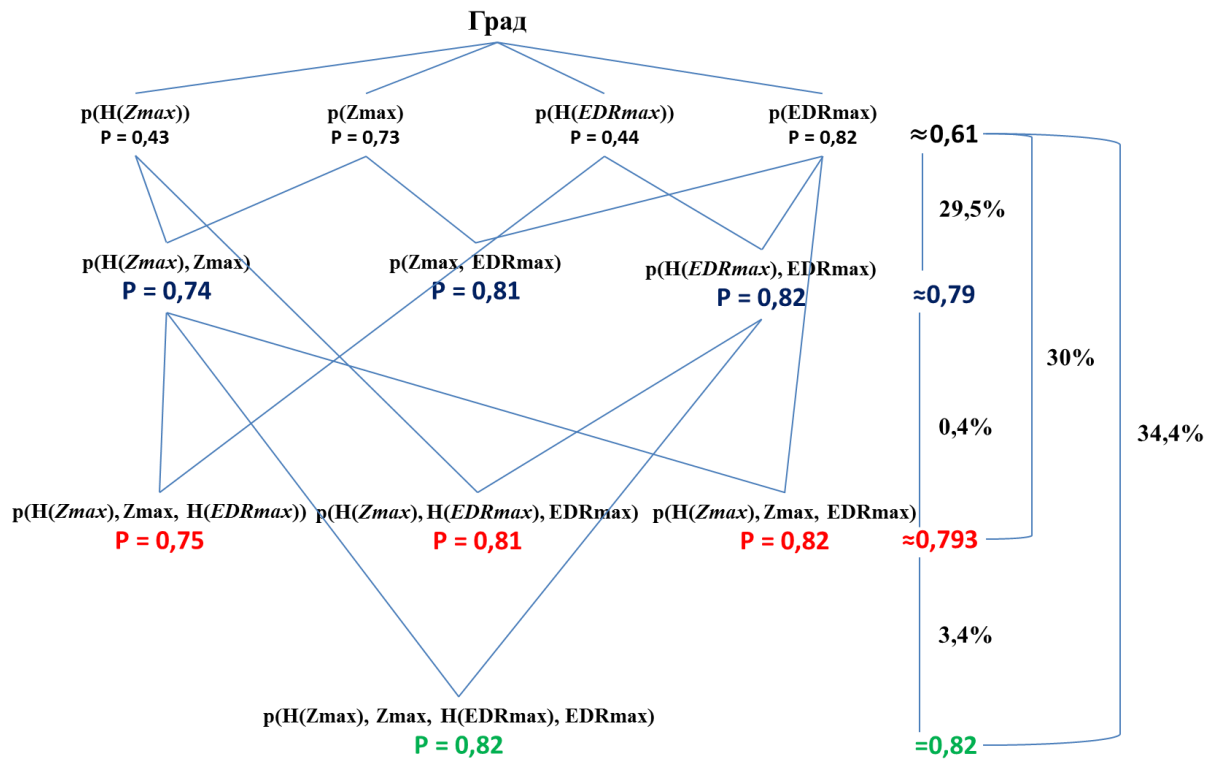


Рисунок 3.11 – Относительный прирост достоверности классификации града при увеличении числа признаков

Проведенный анализ позволяет разработать алгоритм, реализующий метод классификации ОМЯ КДО по байесовскому критерию максимума правдоподобия.

Вывод:

Показано, что при отсутствии достоверной априорной информации и адекватной матрицы потерь, наиболее продуктивным для задачи классификации ОМЯ КДО является критерий максимального правдоподобия. Для принятого критерия получены значения порогов принятия решений и сформированы полные матрицы вероятностей классификации для одномерных, двумерных, трехмерных и четырехмерных размеров признакового пространства.

Анализ результатов показал, что наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$. Большой разделяющей способностью обладают признаки Z_{\max} , EDR_{\max} .

Анализ полученных данных показал, что переход к многомерным плотностям (двумерным, трехмерным и четырехмерным) признакового пространства ведет к значительному увеличению достоверности классификации по сравнению с одномерной задачей. При переходе от одномерной задачи к двумерной достоверность принятия решений возрастает на 30,22%, при переходе к трехмерной - на 34,6%, а к четырехмерной - на 49,3%. Наилучшие результаты достигаются при использовании трех $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max})$ и четырех $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max}, H(EDR_{\max}))$ признаков.

Матрицы вероятностей в указанных случаях демонстрируют максимальные и приемлемые (≥ 0.8) значения вероятности правильной классификации. Незначительное снижение достоверности наблюдается только в случае классификации грозы. Однако, в практических случаях возможно некоторое снижение порога $h_{(л,гз)}$ с учетом большей опасности грозы, либо одновременное «расширение» порогов $h_{(л,гз)}$ и $h_{(гз,гд)}$ для выравнивания достоверностей принятия решений для всех классов.

3.2.2 Алгоритм классификации ОМЯ КДО

Таким образом, задача радиолокационной классификации ОМЯ КДО решается в виде задачи различения статистических гипотез в условиях априорной неопределенности, которая устраняется путем (в данном случае экспериментальным) получения и обработки обучающих выборок, расчета оценок вероятностного описания признаков и их использования в алгоритме в качестве истинных значений. Алгоритм радиолокационной классификации ОМЯ КДО на основании байесовского подхода выглядит следующим образом.

1. Рабочий алфавит классов: «ливень – гроза – град».
2. Рабочий словарь признаков: максимальные значения отражаемости Z_{\max} и турбулентности EDR_{\max} , а также их распределения по высотам $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$.
3. Вероятностное описание признаков формируется в виде оценок плотностей распределения вероятностей информационных параметров, полученных в результате обработки обучающей выборки $p(Z_{\max}, EDR_{\max}, H(Z_{\max}), H(EDR_{\max})/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$.
4. В качестве критерия классификации обоснованно выбран критерий максимума функции правдоподобия.
5. Для выбранного варианта 4-х мерной комбинации признаков производится расчет порогов принятия решений в виде (16).

На основании вышеизложенного, структура алгоритма радиолокационной классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности на основании байесовского подхода выглядит следующим образом – рисунок 3.12.



Рисунок 3.12 – Структура алгоритма радиолокационной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности на основании байесовского подхода

Выводы:

Для решения задачи классификации ОМЯ КДО обоснован байесовский подход в условиях полной априорной неопределенности. Предложен метод классификации по критерию максимума правдоподобия с использованием достаточных статистик отражаемости и турбулентности атмосферы.

Для конкретной постановки задачи разработан алгоритм классификации опасных метеоявлений КДО.

Выводы по 3 главе:

1. Сформированы исходные данные для построения решающих правил в алгоритмах классификации;
2. Для решения задачи классификации ОМЯ КДО обоснован байесовский подход в условиях полной априорной неопределенности. Предложен метод

классификации по критерию максимума правдоподобия с использованием достаточных статистик отражаемости и турбулентности атмосферы;

3. Разработан универсальный байесовский метод классификации опасных метеоявлений кучево – дождевой облачности. На основании анализа информативности признаков классификации для одномерных и многомерных плотностей получен вывод о том, что требуемая достоверность классификации достигается при одновременном использовании всех четырех признаков: максимальных значений отражаемости и турбулентности атмосферы, а также их распределения по высотам. Для конкретной постановки задачи разработан алгоритм классификации опасных метеоявлений КДО.

Глава 4 Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в АМРЛК

4.1 Предложение по корректировке алгоритмического обеспечения АМРЛК в интересах решения задачи классификации опасных метеоявлений

Корректировка алгоритмического обеспечения в соответствии с разработанным методом классификации ОМЯ КДО предполагает изменение критериев классификации с формированием новых порогов принятия решений, а также доработку алгоритмов обработки радиолокационной информации в части формирования оценок признаков классификации Z_{\max} , $H(Z_{\max})$, EDR_{\max} , $H(EDR_{\max})$.

4.1.1 Разработка предложений по изменению критериев классификации ОМЯ КДО

В таблице 10 были показаны критерии классификации ОМЯ КДО в АМРЛК. В результате для конкретизации и в соответствии с накопленной на то время статистикой, определяющей достоверность принятия решений на уровне 0.9, в программном обеспечении АМРЛК «Монокль» критерии классификации были определены следующим образом [76]:

- 1) пороговое значение радиолокационной отражаемости на высоте от 0 до 2 км для МЯ - Ливень $Z_{\text{пор}} = 27 \text{ dBZ}$;
- 2) пороговое значение радиолокационной отражаемости на уровне $H_3 = H_0 + 2500 \text{ м} = 5,2 \text{ км}$ для МЯ - Гроза $Z_{\text{пор}} = 26 \text{ dBZ}$;
- 3) пороговое значение максимальной радиолокационной отражаемости по всему объему облака для МЯ - Град $Z_{\text{пор}} = 45 \text{ dBZ}$,

В случае с ливнем в соответствии с принятым критерием значение высоты не влияет на принятие решения. Поэтому ограничимся рассмотрением в качестве порога значением отражаемости $Z_{\text{пор}} = 27 \text{ dBZ}$ (рисунок 4.1).

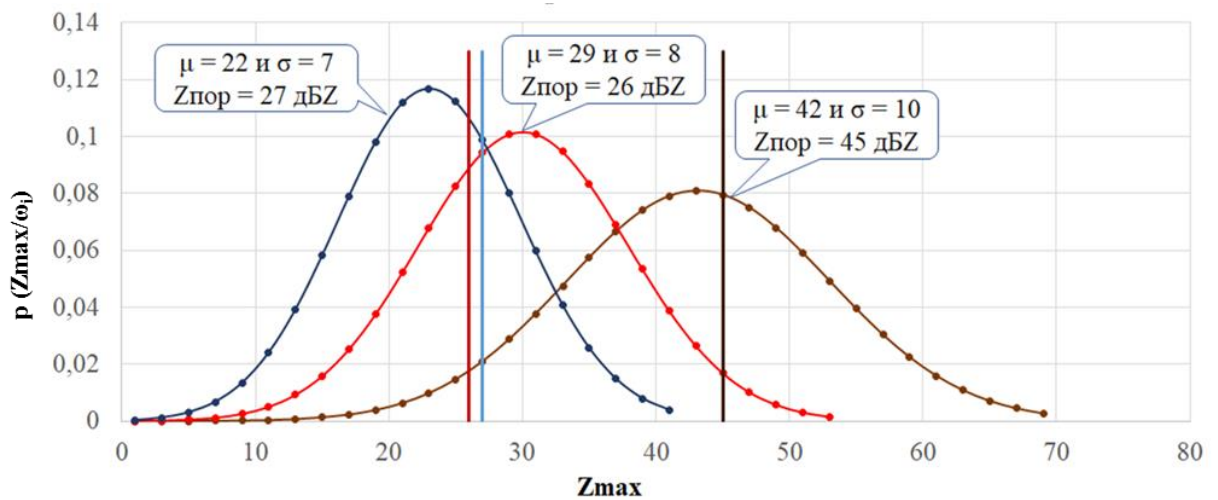


Рисунок 4.1 – Пример установки порогов принятия решений для существующих критериев классификации

Выражение для расчета вероятности правильной классификации ливня имеет вид:

$$P_{\text{л}} = \int_{Z_{\text{пор}}}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x\mu}{\sigma^2}\right) dx \quad (32)$$

Для значений $\mu = 22$ и $\sigma = 7$ данная вероятность составит величину $P_{\text{лл}} = 0.29$, а вероятность пропуска ливня – 0.71. Аналогичный подход применим и для случая с градом, установив порог на уровне $Z_{\text{пор}} = 45 \text{ dBZ}$. В результате для значений $\mu = 42$ и $\sigma = 10$ получим величину вероятности правильной классификации града –

$P_{гргр}=0.42$, а пропуска – 0.58. В случае с грозой пороговое значение отражаемости $Z_{пор} = 26$ dBZ дополнительно обусловлено значением минимальной высоты ее нахождения – на 2.5 км выше высоты нулевой изотермы. Рассчитаем вероятность правильной классификации грозы аналогично первым двум случаям, так как учет дополнительного условия приведет лишь к ее снижению в рассматриваемом случае. Для значений $\mu = 29$ и $\sigma = 8$ получим величину вероятности правильной классификации грозы – $P_{гр} = 0.70$, а пропуска – 0.30.

Даже такой простой анализ показывает, что принятые критерии далеки от оптимальности с точки зрения вероятностей правильной классификации, особенно в случае с ливнем.

Таким образом, для повышения эффективности классификации целесообразно изменить критерии классификации ОМЯ КДО в соответствии с разработанным методом, как это указано в таблице 14.

Таблица 14 – Рекомендуемые критерии классификации ОМЯ КДО в АМРЛК

Используемые параметры атмосферы.				
Zmax – максимальное значение радиолокационная отражаемости [dBZ];				
H(Zmax) – значение высоты, на которой наблюдается максимальная отражаемость [м];				
EDRmax – максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии атмосферы [$m^{2/3}/c$];				
H(EDRmax) – значение высоты, на которой наблюдается максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии атмосферы [м];				
μ - математическое ожидание случайного параметра;				
σ – среднеквадратическое отклонение случайного параметра.				
Ливень				
Параметры	Zmax	H(Zmax)	EDRmax	H(EDRmax)
μ	22	2000	0.2	2000
σ	7	2500	0.2	2500
Гроза				
Параметры	Zmax	H(Zmax)	EDRmax	H(EDRmax)
μ	29	3500	0.5	3000
σ	8	3000	0.12	4000
Град				
Параметры	Zmax	H(Zmax)	EDRmax	H(EDRmax)
μ	42	4000	0.61	4000
σ	10	4000	0.08	4500

По ранее накопленным данным на модели программного обеспечения АМРЛК был проведен анализ эффективности классификации ОМЯ КДО. На рисунке 4.2.а продемонстрирована карта метеорологических явлений, где ливень, гроза и град классифицированы по принятым критериям; а на рисунке 4.2.б – где явления ливня, грозы и града классифицированы по предлагаемым критериям при объединении признаков. Чёрным окружностями показаны места различий очагов ливня, грозы, града. Причём явления ливня, грозы и града, представленные на рисунке 4.2.б имеют бóльшую оправдываемость при сопоставлении данных АМРЛК с наземными метеостанциями.

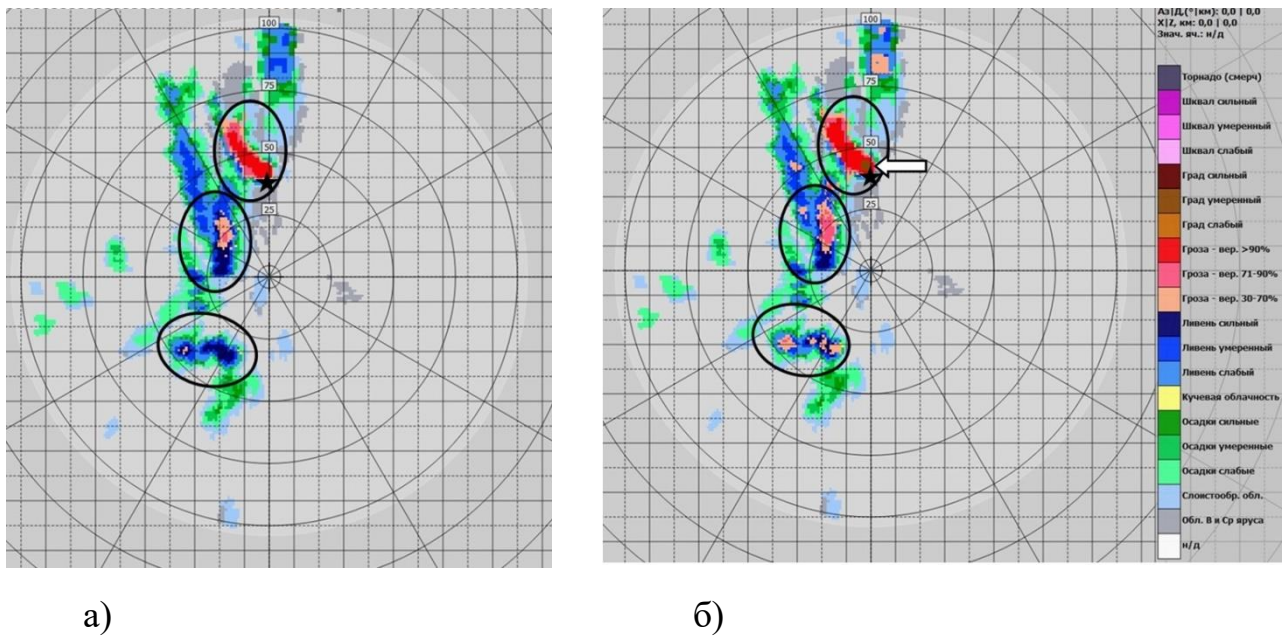


Рисунок 4.2 – Карта метеорологических явлений АМРЛК

Таким образом, оптимизация критериев в части применения байесовского подхода с объединением признаков для очагов ливня, грозы, града, а также изменения порогов принятия решений оправданы.

4.1.2 Разработка предложений по изменению алгоритмического обеспечения АМРЛК при классификации ОМЯ КДО

Для формирования обоснованных предложений по модернизации алгоритмического обеспечения АМРЛК в задаче классификации ОМЯ КДО необходимо рассмотреть структуру и особенности обработки сигналов.

Обработка радиолокационных данных разделена на два последовательных этапа: первичную обработку сигналов и вторичную обработку информации. Каждый из этих этапов предназначен для решения конкретных задач.

Первичная обработка сигналов (рисунок 4.3). Первичная обработка радиолокационных сигналов включает последовательность операций, направленных на преобразование исходных данных. Этот процесс состоит из следующих этапов:

- Сбор и структурирование сигналов: регистрируются отражённые сигналы, которые затем группируются в пачки. Для каждой угловой позиции антенны (в рамках "конических сечений") проводится спектральный анализ в каждом канале дальности.

- Подавление помех и детектирование: осуществляется фильтрация импульсных помех, устанавливаются адаптивные пороги обнаружения, а также проводится количественная оценка мощности сигнала и его идентификация в каждом канале дальности.

- Анализ кинематических параметров: определяются радиальная скорость и ширина спектра метеорологических объектов во всех каналах, где был зафиксирован сигнал.

- Оценка турбулентности: на основе анализа скоростных характеристик в "сигнальных" ячейках рассчитываются соответствующие показатели турбулентности.

– Формирование выходных данных: генерируются векторы отражаемости, радиальных скоростей и параметров турбулентности для каждого угломестного положения антенного устройства.

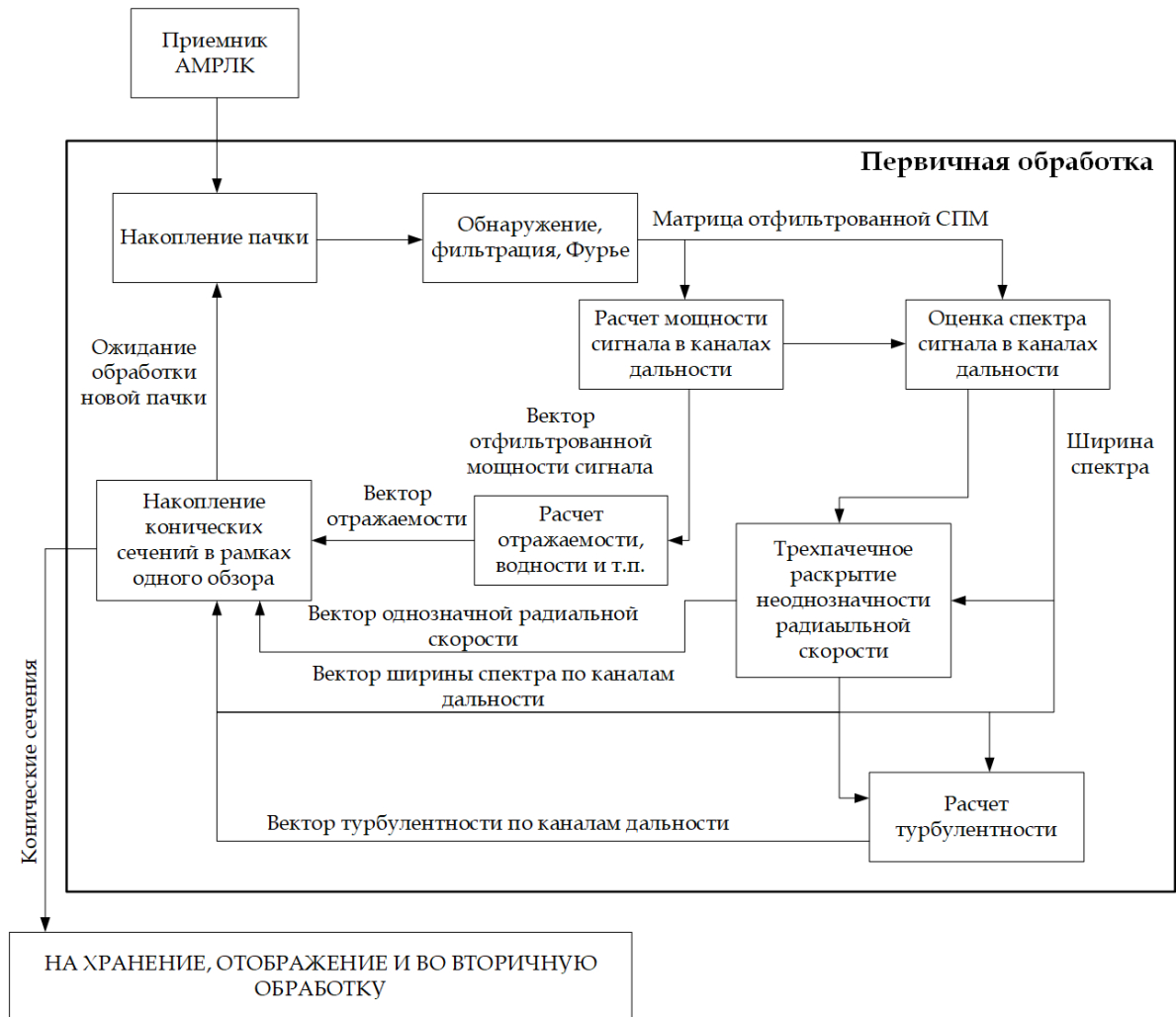


Рисунок 4.3 – Первичная обработка сигналов

Точность определения радиальной скорости достигается за счет использования данных из нескольких последовательных сигнальных пакетов. Для оценки турбулентности применяется корреляционный анализ сигналов, зарегистрированных в разных каналах дальности. Подробное описание разработанного алгоритма оценки турбулентности будет представлено в последующих разделах. Отображение данных АМРЛК становится возможным уже после первичной обработки, так как цикл сканирования позволяет сформировать трехмерную матрицу метеорологических параметров, используя подход "конических сечений".

Вторичная обработка информации (см. рис. 4.4). На втором этапе осуществляется пространственная трансформация и интерпретация данных:

- Построение пространственной модели: создаётся трёхмерная декартова сетка (X, Y, Z) с ячейками $1 \times 1 \times 1$ км, привязанная к местоположению РЛС.

- Усреднение данных: для каждой ячейки сетки вычисляется среднее значение метеорологического параметра, учитывающее все измерения, попавшие в её объём.

- Сглаживание и детализация: промежуточные значения метеорологических параметров рассчитываются методом градиентного анализа, заполняя пробелы между измеренными точками как по вертикали, так и по горизонтали.

- Визуализация и анализ: формируются наглядные карты метеорологических явлений, включающие автоматическое выделение контуров зон, градацию по уровням опасности и возможность построения произвольных сечений для детального изучения.

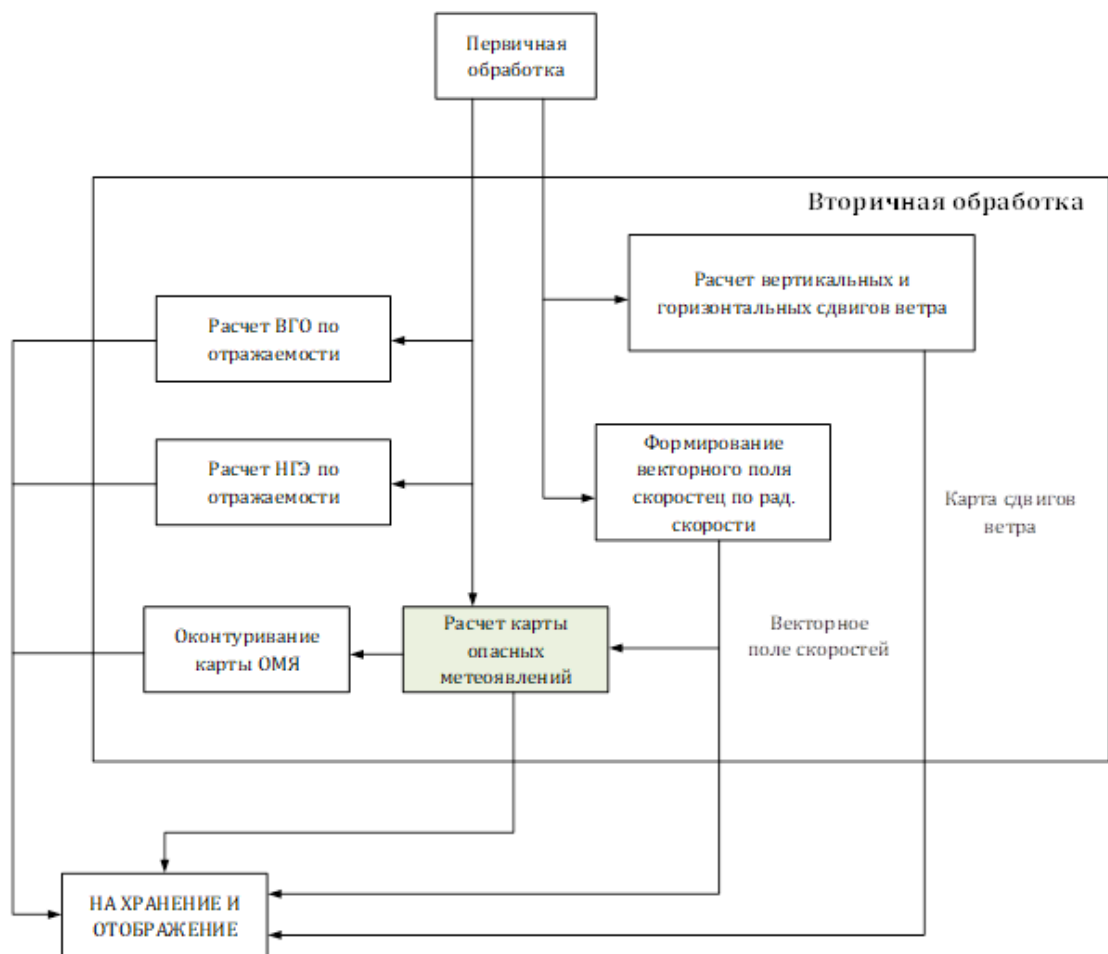


Рисунок 4.4 – Вторичная обработка информации

Несомненно, что основные доработки должны касаться блока «Расчет карты опасных метеоявлений». В начале производится анализ значений признаков классификации в каждой ячейке декартова пространства в блоке «Поиск максимумов» (рисунок 4.5). Затем формируются значения Z_{\max} , $H(Z_{\max})$, EDR_{\max} , $H(EDR_{\max})$ для каждого столбца ячеек. Формируется многомерная плотность, которая сравнивается с порогом, сформированным заранее в соответствии с разработанным алгоритмом классификации. По результатам сравнения формируется карта ОМЯ.



Рисунок 4.5 – Блок «Расчет карты опасных метеоявлений»

Предложенные несущественные доработки алгоритмического обеспечения позволят существенно повысить эффективность классификации ОМЯ КДО.

4.2 Разработка практических рекомендаций по решению задачи классификации ОМЯ В АМРЛК с учетом пространственной вариативности и временной изменчивости.

Предлагаемый метод классификации ОМЯ КДО основывается на анализе распределения максимумов значений радиолокационной отражаемости Z_{\max} и турбулентности EDR_{\max} по амплитуде и высоте. Важным допущением является то, что статистические характеристики этих признаков могут варьироваться в зависимости от климатической зоны, как показано в исследовании [92].

Исследование географической вариативности и временной изменчивости предполагает статистический анализ параметров метеоявлений и установление эмпирических законов распределения. В работе [92] проводится компаративный анализ статистических радиолокационных характеристики, полученных с помощью АМРЛК «Монокль» для трех различных климатических зон Европейской территории России (ЕТР), отличающихся климатом (Тверская, Воронежская, Калининградская области), исходя из местных особенностей годовых атмосферных осадков и среднего числа дней с грозами в год. Дополнительно для Верхневолжской зоны была проанализирована межгодовая изменчивость характеристик во времени, с целью выявления взаимосвязи с климатическими изменениями. Результаты исследования вариативности вероятностных описаний позволят разработать адаптивные критерии классификации ОМЯ КДО, учитывающие региональные климатические особенности, и, как следствие, оптимизировать пороговые значения, используемые при классификации ОЯ.

4.2.1 Географическая вариативность

Своевременное выявление погодных изменений требует понимания региональных особенностей развития атмосферных процессов. Эти особенности обусловлены географическим положением территории, наличием водоемов, рельефом и прочими факторами. Анализ синоптических процессов в привязке к

конкретному региону (области, района) осуществляется с учетом границ, определяемых физико-географическими, метеорологическими или иными подходящими для исследования критериями. Часто, в качестве границ региональных исследований атмосферных процессов используются границы территориальных подразделений, занимающихся гидрометеорологией и мониторингом окружающей среды [77]. Из этого очевидно, что радиолокационные характеристики облачности в различных районах в определенной степени зависят от местных гидрометеорологических условий. Исходя из этого, критерии классификации ОМЯ должны варьироваться для различных синоптических регионов. Формирование региональных критериев классификации должно быть основано на представительном статистическом анализе выбранных признаков классификации.

В каждом синоптическом регионе могут наблюдаться различные опасные метеорологические явления. На европейской территории России, где сконцентрированы основные городские и промышленные центры страны, регулярно наблюдаются опасные метеорологические явления. Климатические особенности и географическое расположение региона способствуют возникновению экстремальных погодных условий, связанных с формированием кучево-дождевых облачных систем. На юге ЕТР грозовая активность может быть более частой из-за перепадов атмосферных параметров и влияния рельефа местности. В прибрежных районах, таких как Калининградская область, могут наблюдаться сильные ветры и штормы из-за близости к морю. В центральных районах ЕТР, таких как Московская, Тверская и Ярославская области, могут возникать сильные ливни и град. Это связано с активным развитием кучево-дождевых облаков, особенно в летний период. Эти различия в опасных явлениях требуют отдельных исследований, а в последующем адаптации критериев классификации ОМЯ для каждого региона [78-80].

Для региональных исследований вариативности признаков классификации был проведён анализ существующих пунктов размещения АМРЛК «Монокль», которые установлены в различных климатических зонах Европейской территории

России. Для выбора конкретных пунктов установки АМРЛК использовались карта с климатическими зонами России, карта годовых атмосферных осадков, карта среднего числа дней с грозами в год на территории Российской Федерации.

Из всех оперативно работающих на территории ЕТР АМРЛК были выбраны три позиции, размещённые в следующих областях: Тверская, Воронежская и Калининградская (Рисунок 4.6).

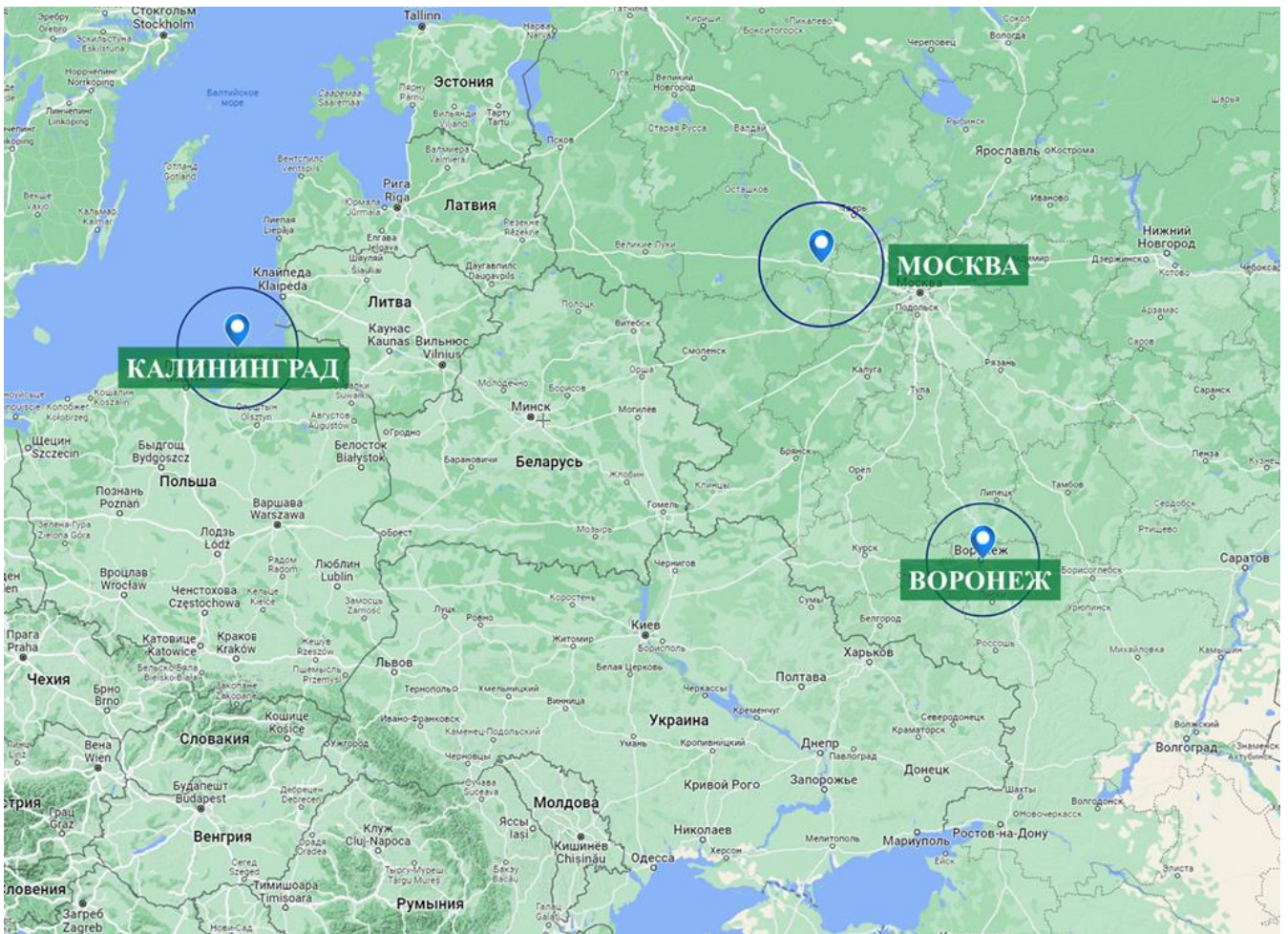


Рисунок 4.6 – Пункты размещения АМРЛК «Монокль» на Европейской территории России

Указанные позиции выделены исходя из региональных особенностей климата:

– Центрально-Чернозёмный район (в частности, Воронежская область, г. Воронеж), а также Центральный район (в частности, Тверская область, аэродром Орловка) – относятся к умеренно-континентальному климату. На аэродроме

Орловка в год выпадает 850-1150 мм атмосферных осадков, в том числе ливневых, в тёплый период – более 400 мм, и более 30 дней с грозами в год. В г. Воронеж выпадает 550-700 мм атмосферных осадков в год, в том числе ливневых, наблюдается от 20 до 30 дней с грозами в год.

Размещение аэродромных метеорологических радиолокационных комплексов в двух точках — в Воронеже (51,670000 с. ш., 39,250000 в. д.) и на аэродроме Орловка (КТА: 56,141871 с. ш., 34,988622 в. д.) — обусловлено научно-практическими задачами мониторинга атмосферных процессов. Расстояние между пунктами составляет 560 км; при этом они принадлежат к одной климатической зоне. Ключевая цель развёртывания оборудования — изучение механизмов перемещения воздушных масс и связанных с ними опасных явлений погоды (ливней, гроз, града), а также характеристик воздушных потоков. В данной части тропосферы средних широт преобладают ветровые потоки западного направления, движущиеся к востоку; их поведение во многом определяется свойствами земной поверхности [81].

– Северо-Западный федеральный округ, а именно Калининградская область, пос. Донское, обладает изменчивым переменным климатом от морского до умеренно-континентального. Зимы в среднем мягкие, однако, в некоторые годы могут наблюдаться периоды более холодной погоды. Лето, в свою очередь, в регионе прохладное. В среднем в год выпадает 700-850 мм осадков, включая ливневые осадки. Количество дней с осадками составляет в среднем 185 дней. Также в регионе наблюдается более 30 дней с грозами в год [82-84].

Размещение АМРЛК в посёлке Донское (54,934964 с. ш., 19,982742 в. д.) нацелено на изучение опасных явлений погоды в зоне с выраженной спецификой атмосферной динамики. Отличительная черта региона — наличие бризовой циркуляции атмосферы, обусловленной близостью к Балтийскому морю.

Для указанной задачи была собрана статистически значимая выборка данных об амплитудном и высотном распределении максимальных значений радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии.

С целью проведения экспериментального исследования опасных метеорологических явлений в различных климатических зонах была разработана программа, включающая следующие этапы [66]:

- выбор станций наблюдений (метеостанции, ДМРЛ-С, грозопеленгаторы), находящихся в зоне охвата АМРЛК, для последующей проверки корректности данных.;
- регистрация и запись сигнала, полученного с помощью АМРЛК, при обнаружении опасных метеоявлений (ливневые осадки, грозы и град);
- сопоставление радиолокационных данных АМРЛК с эталонной информацией и данными из дополнительных источников;
- автоматическое формирование горизонтальных срезов метеорологических радиолокационных продуктов, полученных с АМРЛК, на выбранных высотах для случаев, подтвержденных эталонными и дополнительными источниками информации;
- поиск максимального значения радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности на различных высотных уровнях;
- формирование базы данных высотного распределения параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности.
- статистическая обработка накопленных данных (выбор теоретического распределения, определение выборочных характеристик и проверка гипотезы о виде распределения)

Тверская область, расположенная в северо-западной части ЕТР, отличается умеренно-континентальным климатом с теплой летней погодой и умеренно холодными зимами, характеризующимися устойчивым и продолжительным снежным покровом. Однако следует отметить, что континентальность климата нарастает с запада на восток, что приводит к более резким температурным колебаниям. Помимо умеренного климата, Тверская область подвержена влиянию различных опасных природных явлений. Среди них выделяются сильные осадки в

виде дождей и снегопадов, которые нередко сопровождаются грозами и градом. [85-86].

Для более детального изучения характерных особенностей опасных метеорологических явлений Тверской области, в 2022 году были проведены исследования на аэродроме Орловка. В рамках этой работы была проведена процедура валидации данных с использованием метеостанций, что позволило получить более точные и достоверные данные об особенностях высотного распределения параметров ОМЯ в весенне-осенний период.

В дополнении к исследованиям, проводимым на территории Тверской области, были проанализированы данные, полученные с Воронежской области, которая находится в центре европейской части. Область характеризуется умеренно-континентальным климатом, который является достаточно мягким и благоприятным для проживания. Однако и Воронежская область не лишена опасных климатических явлений, среди которых наибольшую угрозу представляют экстремальные температурные условия, засухи, грозы с градобитием и сильными ливнями, шквалистые ветры. Как и Тверская область, Воронежская область также подвержена влиянию смены воздушных масс, что приводит к нестабильности в погодных условиях [87-91].

К сопоставлению данных о явлениях по данным АМРЛК в 100-километровой зоне (рисунок 4.7) относительно пункта наблюдения, расположенном в г. Воронеж рассматриваются следующие МС:

1) 34026: Конь-Колодезь: 52.15 с.ш.; 39.15 в.д.; 138 м над у.м., удаление от АМРЛК 53км;

2) 34238: Анна: 51.48 с.ш.; 40.42 в.д.; 154 м над у.м., удаление от АМРЛК 85 км;

3) 34231: Лиски: 51.00 с.ш.; 39.50 в.д.; 115 над у.м., удаление от АМРЛК 78 км;

4) 34116: Старый Оскол: 51.30 с.ш.; 37.88 в.д.; 217 над у.м., удаление от АМРЛК 108 км;

5) 34123: Воронеж: 51.80 с.ш.; 39.22 в.д.; 147 м над у.м., удаление от АМРЛК
15 км.

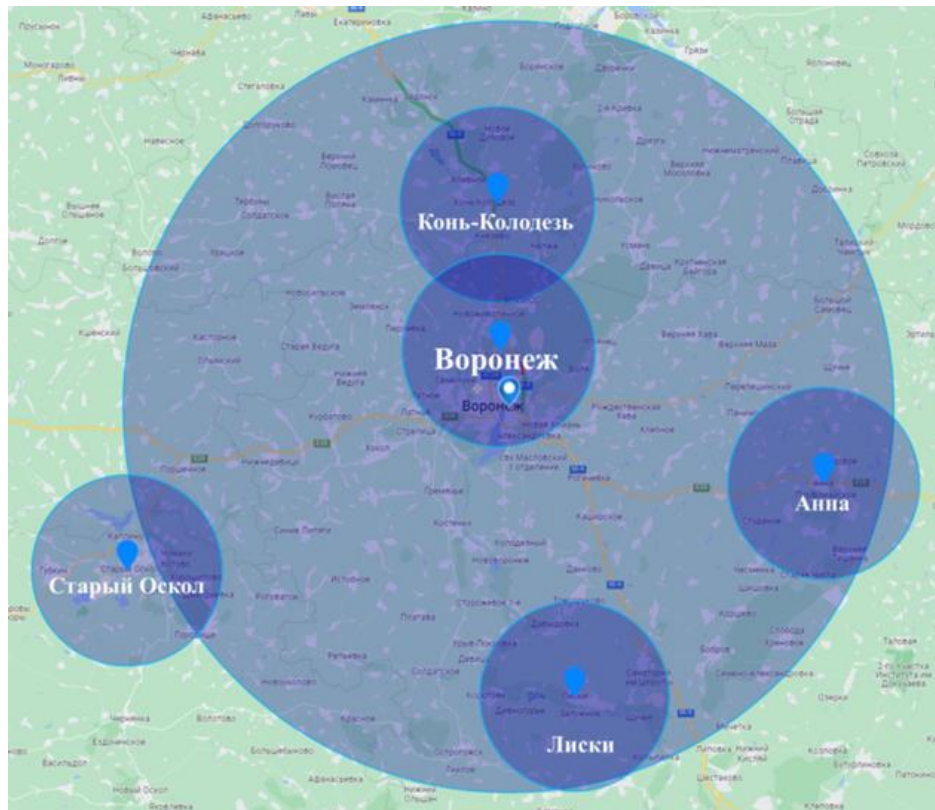


Рисунок 4.7 – Расположение МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в г. Воронеж

Калининград, на побережье Балтийского моря, имеет уникальный климат, который отличается от других регионов России. Этот регион находится в зоне влияния западных ветров, что оказывает существенное влияние на его погоду. Климат Калининграда можно охарактеризовать как переходной от морского к умеренно-континентальному. Одной из особенностей климата Калининграда является частое возникновение, развитие и угасание воздушных вихрей, таких как циклоны и антициклоны, которые вовлекают в свои системы воздушные массы не только умеренных широт, но и арктического и тропического происхождения. Благодаря своему приморскому расположению и близости к Атлантическому океану, Калининградская область подвержена влиянию таких погодных явлений, как конвективная облачность, сильные штормовые ветры и туманы. Лето в Калининграде характеризуется усилением термической конвекции и прогревом

верхних слоев атмосферы. Это приводит к увеличению количества и интенсивности осадков в этом сезоне. Летние осадки часто имеют ливневый характер, сопровождаются шквалистыми ветрами и грозами. В среднем за год в Калининграде выпадает около 700 мм осадков. К концу лета контрасты между морскими и континентальными воздушными массами уменьшаются, что приводит к частичному ослаблению активности атмосферных фронтов. Это может снизить интенсивность осадков, но их продолжительность сохраняется, а иногда даже увеличивается. Помимо описанных выше климатических особенностей, Калининградская область также подвержена влиянию других факторов, формирующих ее погоду. Одним из таких факторов является Балтийское море, которое оказывает смягчающее воздействие на климат региона, особенно в прибрежных районах. Другим важным фактором является рельеф местности, который также влияет на распределение температуры и осадков. [82, 83].

К сопоставлению информации об опасных метеоявлениях по данным АМРЛК, расположенном в п. Донское в 100-километровой зоне (рисунок 4.8) относительно пункта наблюдения, рассматриваются следующие МС:

1) 26607: Пионерский: 54.95 с.ш.; 20.21 в.д.; 28 м над у.м., удаление от АМРЛК 15 км;

2) 26704: Мамоново: 54.47 с.ш.; 19.93 в.д.; 23 м над у.м., удаление от АМРЛК 52 км;

3) 26702: Калининград: 54.70 с.ш.; 20.62 в.д.; 21 м над у.м., удаление от АМРЛК 39 км;

4) 26708: Низовье: 54.70 с.ш.; 20.77 в.д.; 10 над у.м., удаление от АМРЛК 55 км.

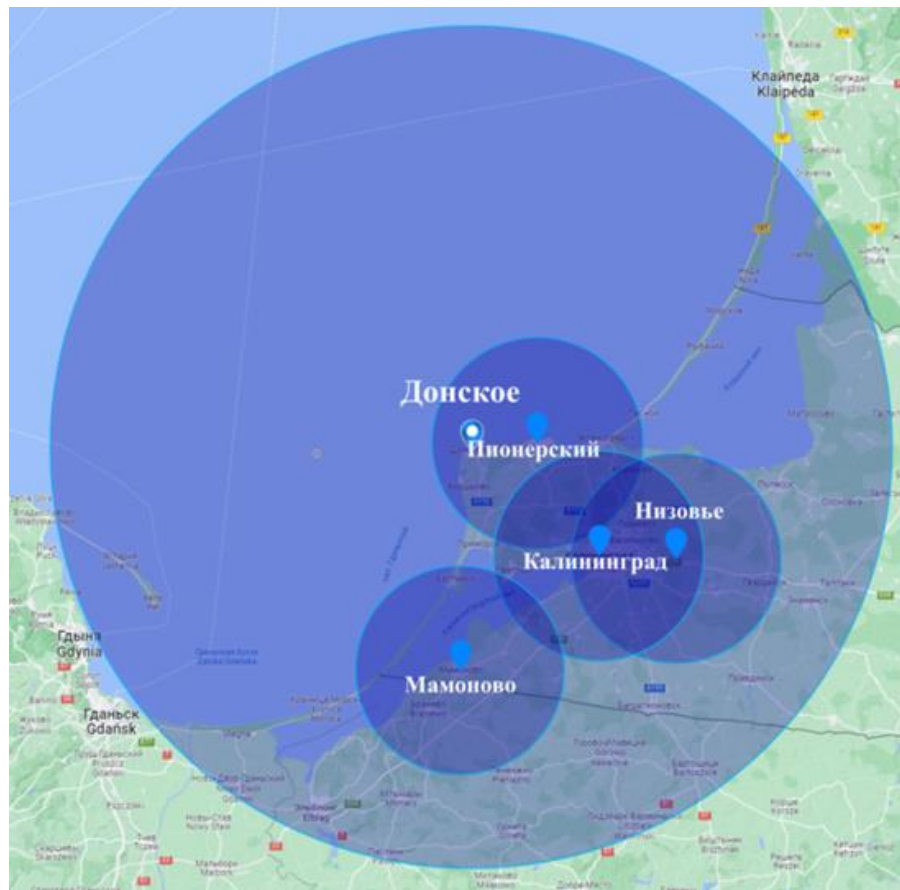


Рисунок 4.8 – Расположение МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в пос. Донское (Калининградской обл.)

В заключение стоит отметить, что климат как Тверской, Воронежской, так и Калининградской областей формируется под воздействием различных факторов: географического положения, рельефа местности, близости к водным объектам и атмосферной циркуляции. Изучение климатических особенностей этих регионов имеет большое значение для прогнозирования погоды, обнаружения и классификации опасных метеоявлений.

Анализ параметров исследуемых метеоявлений начнём с рассмотрения особенностей распространения ОМЯ на территории Воронежской области. Для анализа был выбран весенне-осенний период 2023 г. Основные результаты анализа сводятся к следующему. Высота распространения КДО с ливневыми осадками достигает 8 км, грозовые облака достигают высоты 13-14 км, а градовые облака простираются до 15 км. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в ливневых облаках наблюдается на высоте 1-3 км, и достигает значения 40,52 дБZ.

В свою очередь, максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии в этих облаках достигает значения $0,8352 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. В грозовых облаках Z_{max} располагается на высоте 2-4 км и достигает значения 49,83 дБZ, а максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии составляет $0,9587 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в граде наблюдается на высоте 2-5 км и составляет 61,27 дБZ. EDR_{max} при рассмотрении градового облака составляет $0,9426 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. Следует подчеркнуть, что пространственные характеристики зон максимальной отражаемости демонстрируют заметные различия в зависимости от типа опасного метеорологического явления — будь то град, гроза или ливень. Аналогичная дифференциация наблюдается и в показателях турбулентности. Примечательно, что «ядро» радиоэха при граде обладает значительно большей мощностью и более высокими параметрическими значениями, чем при грозе или ливне.

Распределения Райса для параметров $H(Z_{\text{max}})$, $H(\text{EDR}_{\text{max}})$, Z_{max} и EDR_{max} , полученные в ходе статистического анализа, приведены на рисунках 4.9 и 4.10 для каждого метеоявления.

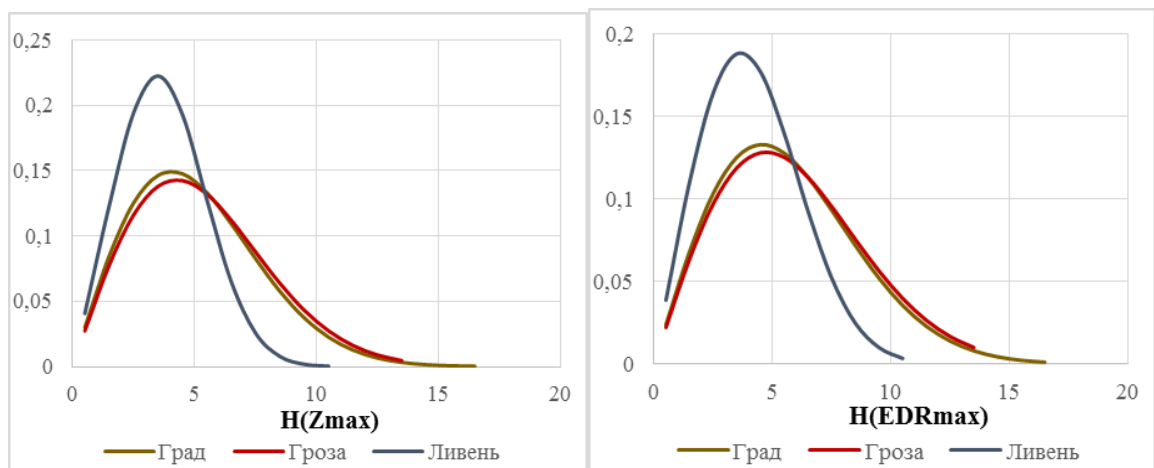


Рисунок 4.9 – Плотность распределения вероятности $H(Z_{\text{max}})$ и $H(\text{EDR}_{\text{max}})$ для рассматриваемых метеоявлений

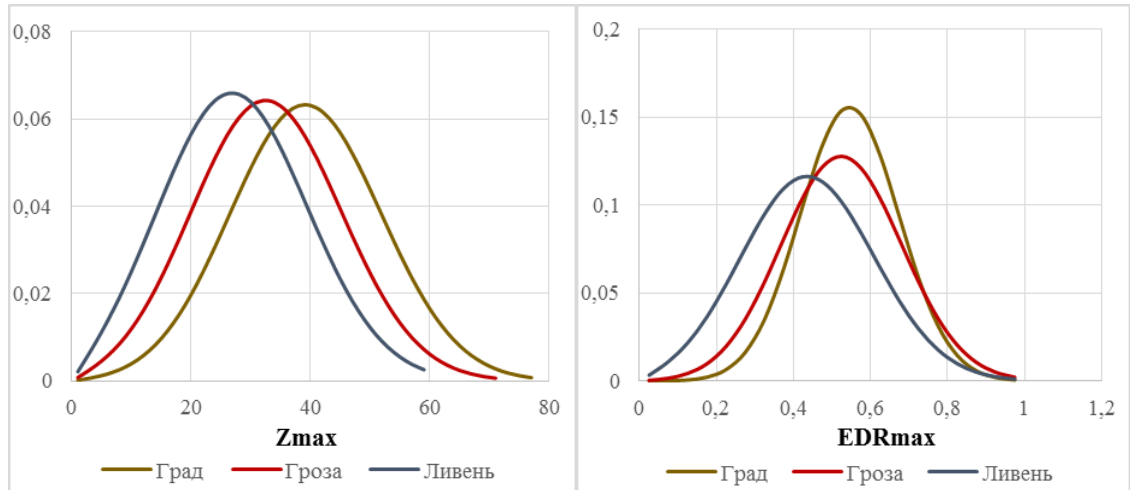


Рисунок 4.10 – Плотность распределения вероятности Z_{max} и EDR_{max} для рассматриваемых метеоявлений

Для проведения анализа на территории Калининградской области также был выбран весенне-осенний период 2023 года. Максимальное значение отражаемости в граде равно $57,1$ дБZ наблюдается на высоте 3-6 км. В свою очередь, градовые облака, могут простираются до высоты 13 км. Максимальное значение EDR_{max} , характерное для данного региона в граде составляет $0,8568 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$. В кучево-дождевых облаках с грозой значение максимальной радиолокационной отражаемости Z_{max} составляет $45,19$ дБZ, что ниже, чем в облаках с градом. Высота, на которой наблюдается максимальная отражаемость в грозе, составляет приблизительно 3 км. "Ядро" радиоэха грозы имеет меньшие размеры, чем у градовых облаков, и распространяется по вертикали до высоты 12 км. Максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии в грозовом облаке примерно составило $0,9732 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$. Кучево-дождевые облака, сопровождающиеся ливневым дождем, имеют меньшую высоту радиоэха (до 8 км) по сравнению с кучево-дождевыми облаками, содержащими град и грозу, и может распространяться до 8 км. Максимальные значения отражаемости в ливнях отмечаются на высотах от 1 до 3 км и составляет $46,73$ дБZ, в свою очередь EDR_{max} для данной территории исследования было зафиксировано около $0,6636 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$.

На рисунках 4.11 и 4.12 представлены распределения Райса для параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , характеризующих рассматриваемые метеорологические явления.

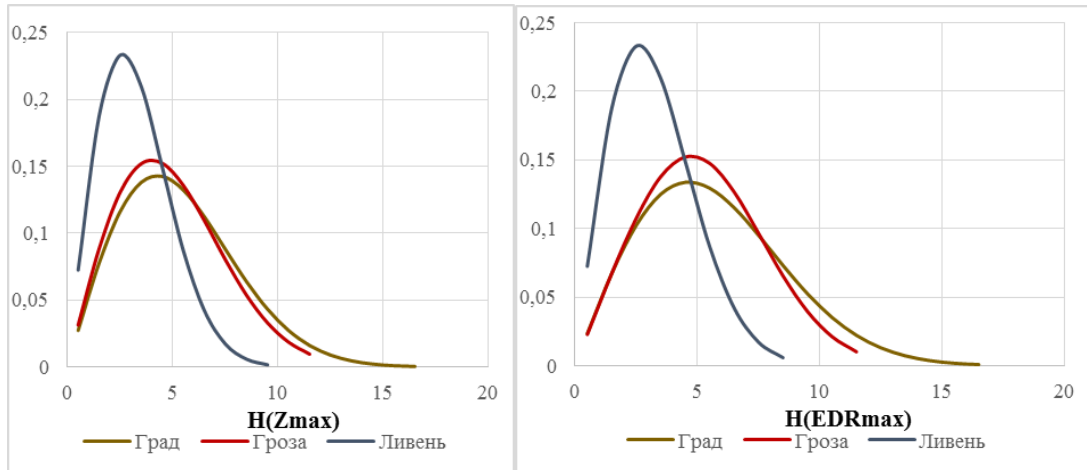


Рисунок 4.11 – Плотность распределения вероятности $H(Z_{max})$ и $H(EDR_{max})$ для рассматриваемых метеоявлений

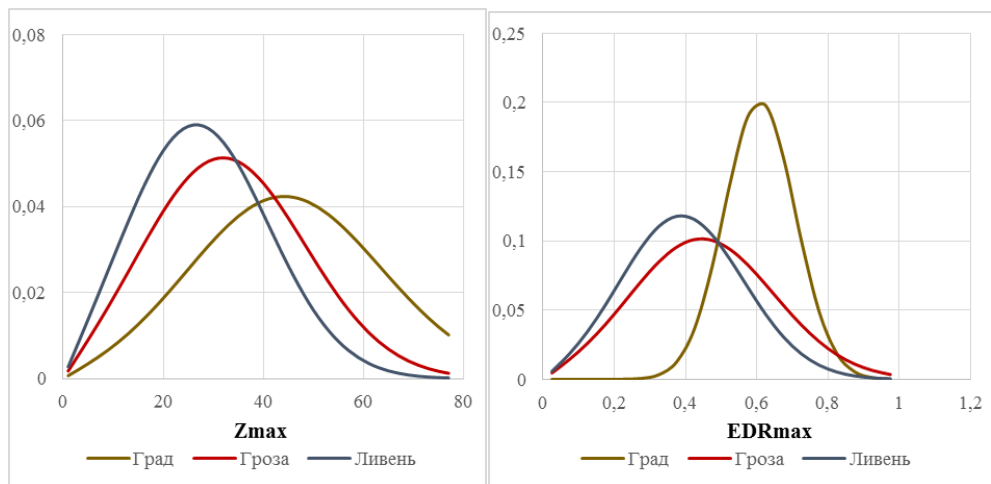


Рисунок 4.12 – Плотность вероятности Z_{max} и EDR_{max} , характерных для различных рассматриваемых метеоявлений

Проведем сопоставление выборочных статистических параметров, описывающих амплитудное и высотное распределение характеристик отражаемости, а также скорости диссипации турбулентной энергии (удельной), полученных расчетным путем для случаев ливневых дождей, гроз и града в

различных географических зонах, с аналогичными данными, характерными для Тверского региона (таблица 15):

Таблица 15 – Географическая вариативность статистических характеристик параметров МЯ

Параметр	Ливень			Гроза			Град		
	Н(Zmax)								
МО	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 2,5$	$\mu = 3,5$	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 4$	$\mu = 1$
	Н(EDRmax)								
МО	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 3$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 1$
	Zmax								
МО	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 23$	$\mu = 22$	$\mu = 24$	$\mu = 28$	$\mu = 29$	$\mu = 30$	$\mu = 40$	$\mu = 42$	$\mu = 37$
	EDRmax								
МО	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 0,35$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,61$	$\mu = 0,53$

Таким образом, по результатам полученных статистических характеристик параметров для ливня, грозы, града в разных географических регионах, можно выделить следующую закономерность. Высота максимального значения радиолокационной отражаемости (Н(Zmax)) имеет самые высокие значения для АМРЛК «Орловка» по сравнению с АМРЛК «Воронеж» (кроме случаев ливня) и с АМРЛК «Донское». По всей видимости, завышенные значения (Н(Zmax)) по данным АМРЛК «Орловка» по сравнению с АМРЛК «Донское» обусловлены большей толщиной воздушных масс с кучево-дождевой облачностью, которые господствовали над пунктом размещения АМРЛК «Орловка» по данным приземных синоптических карт.

Значения Н(Zmax) по данным Воронежской АМРЛК меньше, чем значения Н(Zmax), полученные на АМРЛК «Орловка» (кроме случаев ливня), причём АМРЛК «Воронеж» и АМРЛК «Орловка» установлены в одной климатической зоне. Подобная закономерность объясняется тем, что в весенне-осенний период 2023 года воздушные массы, господствовавшие в п. Орловка и в п. Воронеж, перемещались преимущественно с северо-западного, северного

направлений по данным приземных синоптических карт. Таким образом, пространственный анализ атмосферных процессов выявляет следующую закономерность: первичная локализация воздушных масс с развитой кучево-дождевой облачностью приходилась на район посёлка Орловка. В ходе дальнейшего перемещения в направлении Воронежа эти массы претерпевали существенные изменения — наблюдалось прогрессирующее снижение их энергетического потенциала и структурная деградация (различия в интенсивности процессов подтверждаются сравнением значений Z_{\max} по данным двух АМРЛК: в Воронеже показатели при граде значительно ниже, чем в Орловке.) Также косвенным подтверждением диссипации кучево-дождевой облачности к п. Воронеж являются меньшие значения величины высоты максимальной турбулентности $H(EDR_{\max})$ (кроме случаев ливня) по сравнению с данным АМРЛК «Орловка». При этом завышенные значения $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ для случаев ливня по данным АМРЛК «Воронеж» будут рассмотрены более подробно в динамике вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности в дальнейших исследованиях.

Значения $H(EDR_{\max})$ и значения EDR_{\max} по данным АМРЛК «Донское» обладают хаотичным характером относительно данных других АМРЛК, что объясняется крайне неустойчивым морским климатом умеренных широт, а именно: процессом взаимодействия океан-атмосфера и дальнейшей взаимной перестройкой двух турбулязированных слоев. Эта перестройка охватывает в первую очередь пограничные слои атмосферы и океана, а уже затем посредством вертикальных токов, возникающих в пограничных слоях, передаётся в свободную атмосферу и глубинные слои океана.

Статистические характеристики параметров опасных метеоявлений (ливень, гроза, град) будут уточняться дополнительным сбором статистических данных, также более подробно будет рассмотрена динамика вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности. Важно отметить, что поиск статистических характеристик параметров опасных метеоявлений является попыткой описать их климатические особенности (с точки зрения метеолокации)

того или иного района, где установка АМРЛК уже осуществлена или только планируется. Указанная задача является ресурсоёмкой, поскольку к климатообразующим факторам относятся: географическая широта, подстилающая поверхность, циркуляция воздушных масс. Таким образом, авторы, решая поставленную задачу комплексно, с учётом различных факторов и статистических характеристик, умозаключили следующее: изменение статистических характеристик параметров опасных метеоявлений (ливень-гроза-град) в различных географических регионах объясняется особенностями трансформаций воздушных масс, а также особенностями характеристик самих воздушных масс в разных климатических районах.

Используя критерий максимального правдоподобия определим пороги принятия решения для одномерных задач (Таблица 16).

Таблица 16 – Географическая вариативность порогов принятия решения ОМЯ

Параметр	Ливень/Гроза			Гроза/Град		
	<i>Z_{max}</i>					
МС	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Н_{пор}	27,36дБZ	34,49 дБZ	30,36 дБZ	37,18 дБZ	42,19 дБZ	36,14 дБZ
	<i>EDR_{max}</i>					
МС	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Н_{пор}	0,39 м ^{2/3} ·с ⁻¹	0,492 м ^{2/3} ·с ⁻¹	0,454 м ^{2/3} ·с ⁻¹	0,54 м ^{2/3} ·с ⁻¹	0,83 м ^{2/3} ·с ⁻¹	0,743 м ^{2/3} ·с ⁻¹

Установка пороговых значений представлена на рисунке 4.13. Из приведенных ниже графиков можно отметить, что для параметра Z_{max} порог принятия решений ливень/гроза в Воронеже сдвинулся на 10,96%, в свою очередь для Калининграда данный порог увеличился на 26,1% по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Порог принятия решений гроза/град для Воронежа сдвинулся левее на 2,8%, а для Калининграда увеличился на 13,47%. Тенденция изменения пороговых значений для параметра EDR_{max} выглядит следующим образом: Процентное изменение пороговое значение ливень/гроза для Воронежа составляет 16,4%, а для Калининграда 26,15%. Пороговое значение гроза/град для Воронежа составляет 37,59%, в то время как для Калининграда составит 53,7%.

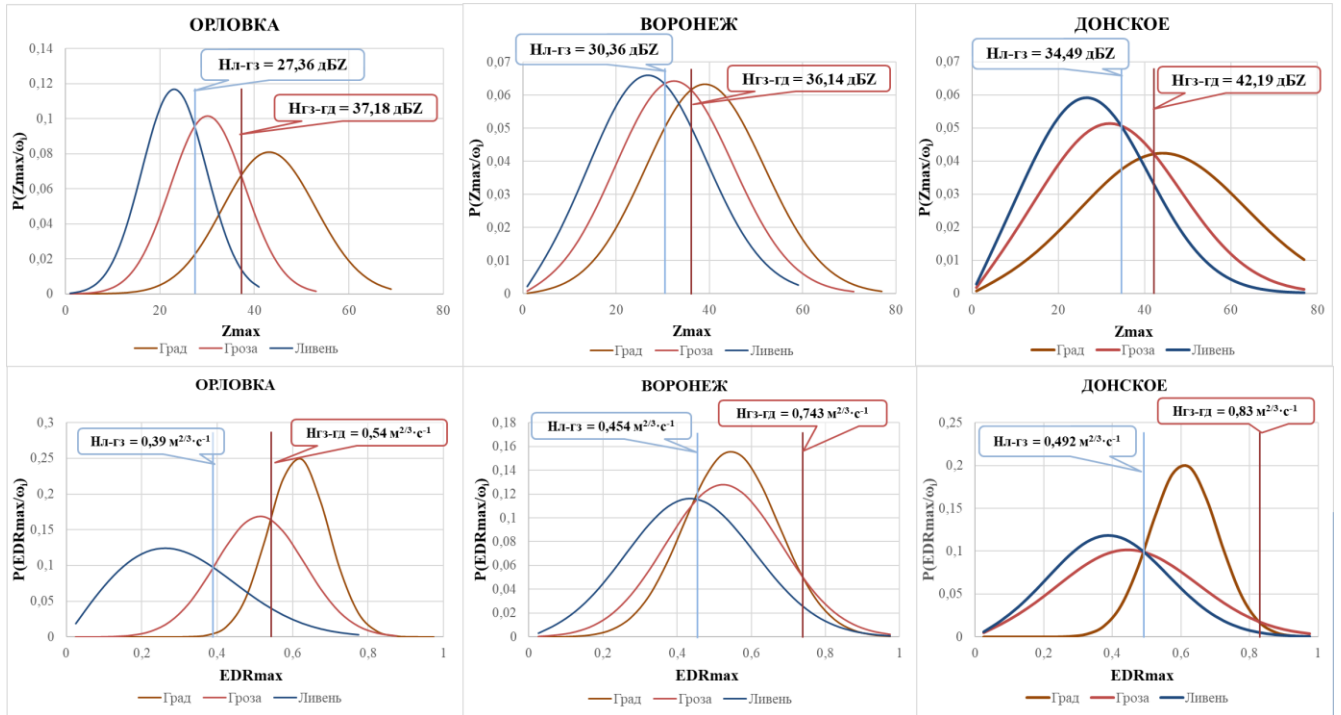


Рисунок 4.13 – Тенденции изменения пороговых значений от географического региона

На основе анализа экспериментальных данных можно отметить, что генезис и эволюция явления, а также пространственно-временная изменчивость его параметров обуславливается взаимодействием макро- и мезомасштабной циркуляции и географическим фактором.

4.2.2 Межгодовая изменчивость

На основании экспериментальных данных был проведен сравнительный анализ летнего мониторинга за опасными метеоявлениями в 2022 г. и в 2023 г. для Верхне-Волжского региона. Годовой ход отчетливо прослеживается по значениям статистических характеристик параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} ,

который показал незначительные различия. Данные, характеризующие временную изменчивость представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Сравнение статистических характеристик межгодовой изменчивости параметров МЯ по данным АМРЛК «Орловка»

Параметр	Ливень		Гроза		Град	
	H(<i>Zmax</i>)					
МО	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3.5$	$\mu = 3.5$	$\mu = 4$	$\mu = 4$
	H(<i>EDRmax</i>)					
МО	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 4$
	<i>Zmax</i>					
МО	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 22$	$\mu = 24$	$\mu = 29$	$\mu = 30$	$\mu = 42$	$\mu = 41$
	<i>EDRmax</i>					
МО	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.35$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.61$	$\mu = 0.6$

На протяжении времени проводились комплексные исследования, направленные на выявление долгосрочных тенденций изменения статистических характеристик.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в течение нескольких лет высотные параметры *Zmax* и *EDRmax* на территории исследования не отличаются от параметров предыдущего года.

При этом в ходе исследования были использованы данные, собранные в течение весенне-осеннего периода 2022 и 2023 годов, характеризующиеся существенным различием по характеру атмосферной циркуляции: в 2022 году преобладала циклоническая активность с обильными и продолжительными осадками, в то время как 2023 год характеризовался антициклональной деятельностью с редкими, но очень сильными осадками. Эти различия позволяют выявить важные тенденции в изменении статистических характеристик метеопараметров, которые могут быть использованы для разработки методов адаптации критериев классификации ОМЯ КДО к конкретной местности.

Вывод:

В рамках разработки нового подхода к классификации ОМЯ КДО, сочетающего анализ отражательных и ВХА, была оценена зависимость характеристик явлений от климатической зоны и местных особенностей циркуляции атмосферы. Проведён статистический анализ данных, полученных с использованием трех единиц АМРЛК, размещённых в различных условиях местных особенностей циркуляции атмосферы на аэродроме Орловка (Тверская область), в г. Воронеж (Воронежская область), в пос. Донское (Калининградская область). Проведен статистический анализ позволил выявить тренды изменения параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , в зависимости от климатических условий и географического расположения АМРЛК. В типовых случаях было количественно определено (в процентах) насколько смещается порог принятия решения для одномерных задач при использовании критерия максимального правдоподобия.

Проведен анализ данных летнего мониторинга на территории аэродрома Орловка в 2022 г. и 2023 г., который показал незначительные изменения статистических данных. Анализ данных по межгодовой изменчивости выявил, что тенденции изменения характеристик кучево-дождевой облачности с ОМЯ связаны с несущественными изменениями климатических условий или метеорологических факторов на рассматриваемой территории.

При разработке методических указаний по классификации ОМЯ КДО в конкретном регионе рекомендуется учитывать полученные статистические данные об изменениях радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков с опасными метеоявлениями.

Выводы по 4 главе:

1. Внедрение разработанного метода классификации ОМЯ КДО предполагает корректировку алгоритмического обеспечения с формированием новых пороговых значений принятия решений, а также доработку алгоритмов обработки радиолокационной информации в части формирования оценок признаков классификации Z_{\max} , $H(Z_{\max})$, EDR_{\max} , $H(EDR_{\max})$;

2. Оптимизация критериев путем применения байесовского подхода с объединением признаков для очагов ливня, грозы, града, а также изменения порогов принятия решений оправданы;

3. Предложенные незначительные доработки алгоритмического обеспечения обладают потенциалом значительного повышения достоверности классификации ОМЯ КДО при относительно небольшом объеме изменений;

4. Выполнена статистическая обработка данных, полученных в результате экспериментального исследования с применением трех единиц АМРЛК, расположенных в различных условиях циркуляции атмосферы. Выявлены статистически значимые тренды изменения параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, Z_{\max} и EDR_{\max} в зависимости от климатических условий и географического расположения АМРЛК. В типовых случаях определены процентные значения сдвига порогов принятия решений в одномерных задачах, возникающие при использовании критерия максимального правдоподобия. В частности, для признака Z_{\max} пороговое значение ливень/гроза (Нл-гз) в Воронеже снизилось на 10.96%, а в Калининграде возросло на 26.1% относительно значений, полученных в Орловке. Аналогично, порог принятия решений гроза/град (Нгз-гд) изменился на 2.8% и 13.47% соответственно. Для признака EDR_{\max} сдвиг порогового значения "ливень/гроза" составил 16.4% для Воронежа и 26.15% для Калининграда, а для порога "гроза/град" - 37.59% и 53.7%.

5. Проведен анализ данных летнего мониторинга на территории аэродрома Орловка в 2022 г. и 2023 г., который показал незначительные изменения статистических данных. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в течение нескольких лет высотные параметры Z_{max} и EDR_{max} на территории исследования не отличаются от параметров предыдущего года. Анализ данных по межгодовой изменчивости выявил, что тенденции изменения характеристик кучево-дождевой облачности с ОМЯ связаны с несущественными изменениями климатических условий или метеорологических факторов на рассматриваемой территории;

6. Полученные значения статистических характеристик изменения радиолокационных характеристик кучево-дождевой облачности с опасными метеоявлениями целесообразно учитывать при разработке методических указаний по формированию критериев классификации ОМЯ КДО в конкретном регионе.

Заключение

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации, научно-технической задачи разработки метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град» в аэродромном метеорологическом радиолокационном комплексе, с учетом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы.

Решение научно-технической задачи опиралось на проведенный и представленный в работе анализ метеоугроз и состояния метеообеспечения полетов воздушных судов по маршруту полета и при совершении взлета и посадки, позволивший выявить:

- противоречие практического характера между обеспечением безопасности полетов по причинам, связанным с представлением достоверной метеоинформации об опасных метеоявлениях кучево-дождевой облачности, и необходимостью повышения достоверности метеоинформации в метеосводках об опасных метеоявлениях в районе аэродрома с учетом наличия ограничений существующих технологий и методов мониторинга опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в современных метеорологических РЛС;

- противоречие научного характера между необходимостью достоверной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома и отсутствием соответствующего метода и алгоритмов классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в районе аэродрома.

В ходе исследований в работе были получены следующие основные **результаты:**

1. Проведен комплексный анализ метеорологических угроз, оказывающих влияние на безопасность полётов, а также проведена оценка характеристик и потенциала современных систем метеообеспечения полётов.

2. Проведен анализ современных требований к достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений «ливень-гроза-град» и выявлены несовершенства в применяемых критериях классификации.

3. Разработана методика проведения экспериментального исследования по регистрации отражательных и турбулентных характеристик в рассматриваемых метеоявлениях и проведен анализ информативности ветровых характеристик в интересах классификации метеоявлений «ливень-гроза-град».

4. Разработан метод и алгоритм классификации опасных метеоявлений повышенной достоверности в АМРЛК с учетом ветровых характеристик.

5. Разработаны рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевыми облаками в АМРЛК в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.

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

1. Безопасность полётов во многом зависит от метеорологических условий. По данным Международной организации гражданской авиации ИКАО, неблагоприятные метеорологические условия были признаны причиной 20% авиационных происшествий. Наиболее опасны и часто встречаются на территории РФ такие метеорологические явления, как ливень, гроза и град. Данные явления обусловлены кучево – дождевой облачностью и сопровождаются достаточно высокой турбулентностью. Несмотря на существующие меры, метеорологическое обеспечение гражданских аэродромов по-прежнему характеризуется недостаточной информативностью и не в полной мере отражает актуальные метеорологические риски.

Установлено, что снижение числа авиационных инцидентов возможно посредством улучшения ситуационной осведомленности диспетчеров УВД и летного состава относительно текущей метеорологической обстановки, при этом наиболее эффективным метеорологическим средством признан

метеорологический радиолокатор, выдающий широкую номенклатуру радиолокационных метеорологических продуктов.

2. Метеорологические радиолокаторы, используемые Росгидрометом, различаются по своим техническим характеристикам и рабочим частотам (X-, C-, S-диапазоны). В России в оперативной практике применяются следующие типы:

- Устаревшие некогерентные радиолокаторы МРЛ-5, которые уже не соответствуют современным требованиям.

- Доплеровские поляризационные радиолокаторы ДМРЛ-С. Их внедрение, начатое в 2008 году в рамках федеральной целевой программы, происходит с существенными задержками из-за высокой стоимости и трудностей при монтаже и эксплуатации. Следует подчеркнуть, что ДМРЛ-С не является аэродромным метеорологическим радиолокатором, не предназначен для работы в зонах ответственности аэропортов и не используется аэродромными метеослужбами. Его обслуживание осуществляет Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета. К тому же, запланированная сеть ДМРЛ-С не обеспечивает покрытие аэродромов Дальнего Востока и Крайнего Севера.

Классификация опасных метеоявлений в данных радиолокационных системах осуществляется на основе комплексных критериев, включающих анализ высотного распределения радиолокационной отражаемости и температуры атмосферы (высоте нулевой изотермы), но при этом не учитывают ветровые характеристики, которые так же получают в результате наблюдения за метеообстановкой.

Очевидно, что критерии классификации требуют оптимизации связанной, в первую очередь, с использованием единого подхода (критерия) для всех метеоявлений. В работе показано, что необходимо адаптировать критерии классификации опасных метеоявлений под конкретные ТТХ и информационные возможности метеорологической РЛС.

3. Анализ гидродинамических факторов, сопровождающих кучево-дождевую облачность, опубликованных в отечественных и зарубежных исследованиях позволил установить, что рассматриваемые метеоявления ливень, гроза и град,

обусловленные КДО, существенно различаются в основном по гидродинамическим параметрам. Наиболее характерными являются отражаемость и турбулентность атмосферы, и их распределение по высотам для различных стадий развития КДО. К тому же данные параметры должны проявляться в параметрах отраженного сигнала при дистанционном зондировании КДО метеорологической РЛС. Оценив эти параметры, определив их особенности и взаимосвязь для перечисленных явлений мы существенно продвинемся в решении задачи их достоверной классификации.

Проведенный анализ путей оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, показал необходимость использования в критериях классификации ОМЯ информации о высотном распределении отражаемости и турбулентности атмосферы.

4. Разработана комплексная методика, охватывающая получение и статистическую обработку высотных распределений радиолокационной отражаемости и удельной СДТЭ. На первом этапе реализована запись "сырых" радиолокационных сигналов с линейного выхода РЛС с использованием специализированного программного обеспечения, обеспечивающего последующую обработку. Регистрация сигналов проводилась в различных синоптических условиях для накопления статистически значимой выборки. На втором этапе выполнена оценка параметров распределения полученных экспериментальных данных, включающая проверку предположений статистических методов, проведение анализа и определение статистической значимости результатов. Сформированные в соответствии с описанной методикой данные служат основой для разработки алгоритмов классификации опасных метеорологических явлений, связанных с кучево-дождевыми облаками.

5. Разработаны метод и алгоритм классификации ОМЯ, связанных с кучево-дождевой облачностью на основании радиолокационных наблюдений, позволяющие обеспечить высокую достоверность классификации, которая позволит повысить ситуационную осведомленность о метеобстановке на маршруте полета и в зоне аэродрома.

В результате проведенного анализа информативности параметров было установлено, что наихудшей информативностью при классификации ОМЯ обладают признаки $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, а большей разделяющей способностью обладают признаки Z_{\max} , EDR_{\max} .

В работе показано, что задача радиолокационной классификации ОМЯ КДО решается в виде задачи различения статистических гипотез в условиях априорной неопределенности, которая устраняется экспериментальным путем получения и обработки обучающих выборок, расчета оценок вероятностного описания признаков и их использования в алгоритме в качестве истинных значений.

Корректировка алгоритмического обеспечения в соответствии с разработанным методом классификации ОМЯ КДО предполагает изменение критериев классификации с формированием новых порогов принятия решений и оценок признаков классификации Z_{\max} , $H(Z_{\max})$, EDR_{\max} , $H(EDR_{\max})$.

Анализ информативности признаков показал, что $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ обладают наименьшей разделяющей способностью, в то время как Z_{\max} и EDR_{\max} оказались более эффективными. Переход от одномерных задач к двумерным, трехмерным и четырехмерным задачам привел к увеличению достоверности принятия решений на 30,22%, 34,6% и 49,3% соответственно. Наилучшие результаты достигнуты при использовании трех признаков $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max})$ и четырех признаков $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max}, H(EDR_{\max}))$.

6. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в АМРЛК. Результаты работы демонстрируют необходимость адаптации определений метеорологических явлений, их параметров и характеристик к специфике конкретного региона. Радиолокационные характеристики облачности, как следствие, зависят от местных гидрометеорологических условий, что требует дифференцированного подхода к критериям классификации ОМЯ для различных синоптических регионов.

В рамках инновационного метода классификации ОМЯ КДО, учитывающего отражательные и ветровые характеристики атмосферы, была оценена их зависимость от климатической зоны и особенностей циркуляции атмосферы.

Исследования проводились на основе данных АМРЛК, расположенных в Орловке (Тверская область), Воронеже (Воронежская область) и Донском (Калининградская область). Статистический анализ экспериментальных данных выявил тренды изменения параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} в зависимости от климата и географического положения АМРЛК.

Для параметра Z_{max} порог принятия решений "ливень/гроза" в Воронеже сдвинулся на 10,96% относительно Орловки, а в Калининграде увеличился на 26,1%. Порог "гроза/град" для Воронежа сместился влево на 2,8%, а для Калининграда увеличился на 13,47%. Аналогичные тенденции наблюдаются для параметра EDR_{max} : процентное изменение порогового значения "ливень/гроза" для Воронежа составляет 16,4%, для Калининграда – 26,15%; для "гроза/град" – 37,59% и 53,7% соответственно. Эти данные указывают на то, что генезис, эволюция и пространственно-временная изменчивость ОМЯ обусловлены взаимодействием макро- и мезомасштабной циркуляции и географическим фактором.

Межгодовая изменчивость также играет важную роль. Сравнительный анализ летнего мониторинга ОМЯ в 2022 и 2023 годах для Верхне-Волжского региона выявил незначительные различия в значениях статистических характеристик параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} . Несмотря на значительные различия в климатических условиях весенне-осенних периодов 2022 (преобладание циклонической деятельности) и 2023 (преобладание антициклональной деятельности) годов, высотные параметры Z_{max} и EDR_{max} на территории исследования оставались стабильными.

Выявленные тенденции изменения статистических характеристик параметров распределения несут важную информацию о взаимодействии климатических процессов и могут служить основой для разработки эффективных методов адаптации при решении задач корректировки критериев классификации ОМЯ КДО для конкретной местности.

Достоверность классификации ОМЯ КДО повышена в среднем на 20 процентов.

Дальнейшие исследования в рамках данной научно-технической задачи направлены на разработку автоматизированного алгоритма для классификации опасных метеоявлений. Этот алгоритм будет основываться на анализе годовых метеорологических данных и использовать расширенный набор классов, включая параметр вертикально интегрированной водности (VIL). Также для автоматизированной системы мониторинга и раннего предупреждения (АМРЛК) будут созданы и внедрены алгоритмы для обнаружения скоплений птиц в зонах взлета и посадки самолетов, а также обнаружение вулканического пепла в атмосфере при совершении полетов по маршруту ВС.

Список используемых источников

1. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Методическое пособие. Третье издание, переработанное и дополненное. Утверждено приказом Росгидромета №170 от 06.07.2009, Москва.
2. **Попко И. Л.** Использование гидродинамического прогноза опасных для авиации метеорологических явлений в условиях изменяющегося климата. – 2015.
3. **Рыбалкина А. Л., Спирин А. С., Трусова Е. И.** Уменьшение влияния неблагоприятных внешних условий в аэропортах местного значения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – №. 3.
4. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства // Отчеты МАК о состоянии безопасности полетов – 2012 - 2020 гг.
5. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации РФ // Информационные бюллетени ФАВТ - 2012 - 2020 гг.
<https://aviamettelecom.ru/activity/airweather/>
6. **Брылев Г. Б., Низдойминога Г. Л.** Использование радиолокационных данных в синоптической практике. Методическое пособие //Л.: Гидрометеиздат. – 1977.
7. Авиационные факторы риска. ВМО. Программа обучения и подготовки ETR - № 20.— 2007 — 53 с.
8. **Яковлев А.М.** Авиационная метеорология, издательство «Транспорт»,1971 г. – 248 с.

9. **Камзолов С. К., Самохин А. В.** Об опасности полетов в грозу (версии двух катастроф) //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2012. – №. 180.
10. **Богаткин О.Г.** Авиационная метеорология. Учебник/ О.Г. Богаткин - СПб.: Изд. РГГМУ, 2005.-203 с.
11. Безопасность полетов [Электронный ресурс]. – (URL: www.refsr.ru/referat-6230-13.html)
12. Что может сделать крупный град самолёту [Электронный ресурс]. – (URL: <https://zen.yandex.com/media/aviapub/chto-mojet-sdelat-krupnyi-grad-samoletu-5c94d81e62c99e00b3e1cfc8>)
13. **С.И. Заичко, А.И.Князь** Возможности радиолокационного обнаружения ураганов метеорологическими радиолокаторами.
14. Почему смерчи – это серьёзный климатический вызов для России URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/5eb05d789a7947314112da05>
15. Водовороты воздушного океана. Журнал «Вокруг света» URL: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/3868/>
16. **Doviak R. J. et al.** Doppler radar and weather observations. – Courier Corporation, 2006, 562 pp
17. **Губенко И. М.** Исследование физических процессов в конвективных облаках во время гроз на основе численного моделирования : дис. – Москва, 2016. 130 с.
18. Сложные фронты, возникающие в результате смыкания холодного фронта URL: https://studopedia.ru/13_146632_bilet-.html
19. **Васильев А. А., Шметгер С. М.** Влияние кучево-дождевых облаков на условия полетов //М.: Гидрометеиздат. – 1984.
20. **Шишкин Н. С.** Облака, осадки и грозовое электричество. – Гидрометеиздат, 1964.
21. Гроза, ливень, град, шквал, смерч... Что их объединяет? URL: <https://meteoinfo.ru/component/content/article/1-2009-10-01-09-03-06/5296-12062012->

22. **Пчелко И. Г.** Авиационная метеорология //Л.: Гидрометеиздат. – 1963. – Т. 336.
23. **Седунов Ю. С.** (ред.). Атмосфера: Справочник:(Справочные данные, модели). – Гидрометеиздат, 1991.
24. **Степаненко В.Д., Гальперин С.М.** Радио-технические методы исследования гроз, 1983
25. **Брылев Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминога Г. Л.** Радиолокационный характеристики облаков и осадков. – Гидрометеиздат, 1986.
26. **Мучник В. М.** Физика грозы. – Гидрометеиздат, 1974
27. **Hubbert J., Bringi V. N.** The effects of 3-body scattering on differential reflectivity //Conference on Radar Meteorology, 28 th, Austin, TX. – 1997. – С. 1997.
28. **Lemon L. R.** The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature //Weather and forecasting. – 1998. – Т. 13. – №. 2. – С. 327-340.
29. **Mason B. J.** The physics of clouds, Clarendon. – 1971, 671 pp.
30. **Waldvogel A., Federer B., Grimm P.** Criteria for the detection of hail cells //Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1979. – Т. 18. – №. 12. – С. 1521-1525.
31. **Гашина С. Б., Сальман Е. М.** Особенности радиолокационных характеристик грозовых облаков //Тр. ГГО. – 1965. – №. 173. – С. 19-25.
32. **Калинин Н. А., Смирнова А. А.** Методика расчета водности и водозапаса кучево-дождевой облачности //Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2008. – №. 1.
33. **Афанасьева Ю.С.** Опасные явления погоды для авиации в северо-западном федеральном округе
34. **Калинин Н. А., Поморцева А. А.** Влияние орографии на поля облаков и осадков в Пермском крае //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – №. 37. – С. 84-93.
35. **Стасенко В. Н.** Многоволновое активно-пассивное зондирование конвективных (грозовых) облаков : дис. – Нальчик : [Высокогорн. геофиз. ин-т], 2004

36. **Бибилашвили Н. Ш., Лапчева В. Ф., Сулаквелидзе Г. К.** Водность в ливневых облаках и некоторые вопросы прогноза ливневых осадков // Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1960. – Т. 131. – №. 3. – С. 549-551.
37. **Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И. и др.** Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике, Вторая редакция 2017 г.
38. **Дементьева С.О.** Процессы коллективной зарядки в нижней атмосфере и их описание в численных мезомасштабных моделях.
39. **Хргиан А. Х., Мазин И. П.** (ред.). Облака и облачная атмосфера: Справочник. – Гидрометеиздат, 1989.
40. **Feist M.** A statistical approach to evaluate the parametrisation of turbulence in convection-permitting models using radar-retrieved eddy dissipation rates :дис. – University of Reading, 2019.
41. **Bouniol D., Illingworth A., Hogan R.** Deriving turbulent kinetic energy dissipation rate within clouds using ground based radar // Proceedings of ERAD. – 2004. – Т. 281. – №. 285.
42. **Kollias P. et al.** Radar observations of updrafts, downdrafts, and turbulence in fair-weather cumuli // Journal of the atmospheric sciences. – 2001. – Т. 58. – №. 13. – С. 1750-1766.
43. **Meischner P. et al.** Eddy dissipation rates in thunderstorms estimated by Doppler radar in relation to aircraft in situ measurements // Journal of atmospheric and oceanic technology. – 2001. – Т. 18. – №. 10. – С. 1609-1627.
44. **Sand W. R.** Observations in hailstorms using the T-28 aircraft system // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1976. – Т. 15. – №. 6. – С. 641-650.
45. **Frisch A. S., Strauch R. G.** Doppler radar measurements of turbulent kinetic energy dissipation rates in a northeastern Colorado convective storm // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1976. – Т. 15. – №. 9. – С. 1012-1017.

46. **Knupp K. R., Cotton W. R.** An intense, quasi-steady thunderstorm over mountainous terrain. Part III: Doppler radar observations of the turbulent structure //Journal of Atmospheric Sciences. – 1982. – Т. 39. – №. 2. – С. 359-368.
47. **Istok M. J., Doviak R. J.** Analysis of the relation between Doppler spectral width and thunderstorm turbulence //Journal of Atmospheric Sciences. – 1986. – Т. 43. – №. 20. – С. 2199-2214.
48. **Grandia K. L., Marwitz J. D.** Observational investigations of entrainment within the weak echo region //Monthly Weather Review. – 1975. – Т. 103. – №. 3. – С. 227-234
49. **Donaldson Jr R. J.** Flight Hazards in Thunderstoms Determined by Doppler Velocity Variance //Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1969. – Т. 8. – №. 1. – С. 128-133.
50. **Базлова Т. А. и др.** Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети //СПб.: Гидрометеиздат. – 2002. – Т. 332. – С. 2.
51. **Машуков Х. Х.** Исследование электрических полей в грозовых облаках ракетным зондом. – 2002.
52. Методическое письмо об итогах работы в 2012 году функционирующей сети «МРЛ - ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ» и сети доплеровских метеорологических радиолокаторов С-диапазона (ДМРЛ-С), создаваемой в рамках ФЦП. СПб.: ГГО, 2013.
53. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета. СПб., 2013
54. **Басов И.А., Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В.** Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормооповещения и метеобеспечения авиации. СПб: ФГБУ «ГГО», 2013. 137 с
55. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб.:1993 – 342 С

56. **Vasiliev O.** The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex “Monocle”/ Vasiliev O., Bolelov E., Galaeva K., Gevak N., Zيابkin S., Kolesnikov E., Peshko A., Sinitsyn I.// 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)
57. **Васильев О.В., Коротков С.С., Галаева К.И., Бояренко Э.С.** Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26. №2
58. **Дуда Р., Харт П.** Распознавание образов и анализ сцен. Москва: Мир, 1976.
59. **Горелик А. Л., Скрипкин В. А.** Методы распознавания. М //Высшая школа. – 1989.
60. **Репин В.Г., Тартаковский Г.П.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: 1977.
61. **Фомин Я. А., Гарловский Г. Р.** Статистическая теория распознавания образов. Москва: Радио и связь, 1986. - 263 с.
62. **Тихонов В. И., Бакаев Ю. Н.** Статистическая теория радиотехнических устройств //М.: Изд. ВВИА им. проф. НЕ Жуковского. – 1978.
63. **Galaeva K.I.** Analiz rezul'tatov ispytaniy i sertifikatsii meteorologicheskogo radiolokatsionnogo kompleksa blizhnei aerodromnoi zony//Nauchnyi vestnik MGTU GA, tom 23, no01, 2020, p. 28-40 (in Russian)
64. **Vasiliev O. V. et al.** The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex “Monocle” //2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of NE Zhukovsky (TSCZh). – IEEE, 2021. – С. 64-72.
65. **Бекряев В.И.** Основы теории эксперимента. Учебное пособие. – Спб.: Изд. РГГМУ, 2001 – 266 с.

66. **Дегтярев А.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А.** Статистические методы обработки метеорологической информации. Учебник. - СПб: ООО «Андреевский издательский дом», 2015 - 225 с.
67. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика.-2-ое изд. 2004
68. Аппроксимация на основе типовых распределений [Электронный ресурс] / Аппроксимация закона распределения экспериментальных данных URL: <https://poznayka.org/s97706t1.html> (Дата обращения: 12.02.2024)
69. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание. М.: Финансы и статистика, 1983 – 471 с.
70. **Тихонов В. И.** Оптимальный прием сигналов. 198
71. **Ту Д., Гонсалес Р.** Принципы распознавания образов. // Москва : Мир 1978
72. **Вентцель Е. С.** Теория Вероятностей (4 издание). // Москва : Наука, 1969
73. **Рубан А. И.** Методы анализа данных: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. // Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с
74. **Васильев О. В., Горшков П. С., Шепеть И. П.** Радиолокационная классификация опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности // Статья в настоящем сборнике 2024 XXI Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of NE Zhukovsky (TSCZh). IEEE, 2024
75. **Васильев О.В., Бояренко Э.С., Савельев А.Н., Горбачев Н.В.** Анализ информативности признаков классификации опасных метеоявлений по результатам радиолокационных наблюдений // Научный вестник МГТУ ГА. 2024. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-informativnosti-priznakov-klassifikatsii-opasnyh-meteoyavleniy-po-rezultatam-radiolokatsionnyh-nablyudeniyy>.
76. Руководство по эксплуатации. Метеорологический радиолокационный комплекс ближней аэродромной зоны АМРЛК-ГА – Москва, 2016 – 44 с.

77. **Хандожко Л.А.** Региональные синоптические процессы: Учеб. Пособие // Ленингр. гидрометеорол. ин-т. - Ленинград: ЛГМИ, 1988. - 103 с.
78. **Голицын Г. С. и др.** Природные опасности России : Монография в 6 томах / Г. С. Голицын, А. А. Васильев, С. Н. Куличков [и др.]; Под редакцией Г.С. Голицына, А.А. Васильева. Том 5. – Москва : КРУК, 2001. 296 с.
79. **Акимов В.А., Дурнев Р.А., Соколов Ю.И.** Опасные гидрометеорологические явления на территории России / МЧС России. — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. — 316 с.
80. **9. Kononova N. K., Lupo A. R.** An Investigation of circulation regime variability and dangerous weather phenomena in Russia in the 21st century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Т. 606. №. 1. С. 012023.
81. **Лаптиева, О. А.** Климатические и географические условия Воронежской области, как фон проявления негативных природных процессов / О. А. Лаптиева, Ю. Ю. Герасименко, Д. И. Чечин // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2021. № 1(12). С. 23-29.
82. **Федоров Е. Е. и др.** Климат Калининградской области // Почвы Калининградской области». Изд-во. 1981.
83. **Двоеглазова Н.В.** Современное состояние климатической системы Калининградской области на фоне глобального потепления//Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2019. № 1. С.35-45.
84. **Каушила К.А. и др.** Климат Калининграда: монография / К.А. Каушила, А.И. Буз, Г. Алосявичене [и др.]; Под редакцией К.А. Каушила, Ц.А. Швер. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1983. 143 с.
85. **Дорофеев А.А. и др.** География Тверской области: книга / А.А. Дорофеев, А.А. Ткаченко, А.С. Щукина [и др.]; Под редакцией А.А. Ткаченко. – Тверь: ТГУ, 1992. 290 с.
86. **Лазарев О.Е., Махрова Е.Д., Петина А.М.** Климатическое картографирование территории Тверской области: состояние и перспективы// Вестник ТвГУ. 2016. №1. С.56-67.

87. **Акимов Л.М.** Пространственно-временные закономерности распределения климатических характеристик на территории Воронежской области//Вестник Воронежского государственного университета. 2013. №1. С.192-198.
88. **Дмитриева В. А.** Термический режим г. Воронежа на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2001. №. 1. С. 129-135.
89. **Акимов Л.М., Акимов Е.Л.** Характеристика циркуляционного режима территории Воронежской области// Труды Хоперского государственного заповедника. Статья в сборнике статей. 2014. Вып.9. С.3-11.
90. **Чернокульский А.В. и др.** Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным/ А.В. Чернокульский, А.В. Елисеев, Ф.А. Козлов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2022. №5. С.27-41. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-5-27-41>
91. **Веремей Н. Е. и др.** Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа/ Н.Е. Веремей, Ю.А. Довгалюк, С.В. Ефимов [и др.] //Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 32-43.
92. **Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И.** Анализ географической вариативности и временной изменчивости статистических характеристик отражаемости и турбулентности атмосферы для кучево-дождевой облачности на Европейской территории России / «Геосферные исследования», 2025 г., №3, с.139-152.
93. **Atlas D.,** Advances in Radar Meteorology. Advances in Geophysics. – New York: Academic Press Inc., 1964, V.10, p. 318-468.
94. **Bent A.E.** Radar echoes from atmospheric phenomena. M.I.T., Radiation Lab., Rep., 1943, № 173, p. 10.
95. **Баттан Л.Дж.** Радиолокатор наблюдает за погодой: Научно-популярное издание. – Л.: Гидрометеиздат, 1964 – 105 с.

96. **Austin P.M., and Bemis, A.C.** A quantitative study of the “bright band” in radar precipitation echoes. // J. Meteorol., 1950, № 7, p.145-150.
97. **Wexler R.** An evaluation of the physical processes in the melting layer. Proc. 5th Weather Radar Conf., Am, Meteorol. Soc. – Boston, 1955, p. 302-334
98. **Wexler R.** Theory of observation of radar storm detection. Compendium of Meteorol., Am. Meteor. Soc. – Boston, 1951, p. 1283-1289
99. **Atlas, D., Kerker, M., and Hitschfeld, W.** Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric particles. J. Atmospheric Terrest. Phys., 1953, №3, p. 108 119.
100. **Marshall, J. S., and Hitschfeld, W.** The interpretation of the fluctuating echo for randomly distributed scatterers. J. Phys.,1953, №31, P. 962-994.
101. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике – М., 2014 – 110 с.
102. **Battan, L. J.** Radar Meteorology. – Chicago: Univ. of Chicago Press, 1959, p.161.
103. Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года. М. 2008.
104. **Бояренко Э.С., Болелов Э.А., Васильев О.В., Коротков С.С.** Экспериментальный статистический анализ радиолокационных сигналов, отраженных от опасных метеорологических явлений. // Научный вестник МГТУ ГА. №26(5), 2023. С.19-29.
105. **Бояренко Э.С., Васильев О.В., Галаева К.И.** Обоснование исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений. // Научный вестник МГТУ ГА. №26(6), 2023. С.8-21.
106. **Болелов Э.А., Васильев О.В., Галаева К.И., Бояренко Э.С.** Байесовский метод распознавания опасных метеорологических явлений на основе радиолокационных наблюдений. // Электромагнитные волны и электронные системы. Т.30, №1. 2025. – С. 55-67.

107. **Болелов Э.А., Васильев О.В., Галаева К.И., Бояренко Э.С.** Алгоритм комплексной обработки информации о профиле температуры в районе аэродрома. // Цифровая обработка сигналов. №2, 2024. С. 71-76.
108. **Савельев А.Н., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И.** Программно-алгоритмический модуль автоматизированной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности в метеорологическом радиолокационном комплексе «Монокль» // Цифровая обработка сигналов. №4, 2025. С. 54-61.
109. Обоснование приоритетных направлений оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений в наземных метеорологических РЛС. Отчет по НИР в рамках конкурса НИР студентов и молодых ученых УЗ ГА, посвященной 100-летию со дня создания отечественной ГА / Руководитель Васильев О.В. - М.: МГТУ ГА, 2023
110. **Бояренко Э.С.** Задача классификации опасных метеорологических явлений в доплеровских метеорологических РЛС // Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы : Межвузовский сборник научных работ, Москва, 18 ноября 2021 года. Том Выпуск 11. – Москва: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2021. – С. 151-153.
111. **Бояренко Э.С.** Направления совершенствования критериев классификации метеоявлений в доплеровских метеорологических РЛС // Гагаринские чтения - 2022 : Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVIII, Москва, 12–15 апреля 2022 года. – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 316-317.
112. **Vasiliev O.V. et al.** Concerning the issue of classification of hazardous weather events //2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of NE Zhukovsky (TSCZh). – IEEE, 2022. – С. 76-78.
113. **Бояренко Э.С., Коротков С.С.** Параметрическое описание радиолокационных признаков классификации ливней // Сборник трудов конференции «Передача, приём, обработка и отображение информации о

быстропротекающих процессах. XXXIII Всероссийская научно-техническая конференция школы-семинара» 2022, С.83-86

114. **Бояренко Э.С.** Анализ экспериментальных данных ветровых характеристик в верхневолжской климатической зоне // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2023. – № 11. – С. 25-33.

115. **Бояренко Э.С.** Пути оптимизации критериев классификации опасных метеоявлений // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации, Москва, 18–19 мая 2023 года. – Москва: ИД Академии имени Н. Е. Жуковского, 2023. – С. 360-361.

116. **Болелов Э.А., Бояренко Э.С.** Статистический анализ распределения отражаемости и турбулентности по высотам для ливня, грозы и града в Верхневолжском регионе // Радиолокационное исследование природных сред : Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Ключева Николая Фомича, Санкт-Петербург, 19–20 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2024. – С. 452-457.

117. **Бояренко Э.С.** Анализ географической вариативности статистических характеристик опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности // Гагаринские чтения 2024 : Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 09–12 апреля 2024 года. – Москва: ООО "Издательство "Перо", 2024. – С. 345-346.

118. **Бояренко Э.С.** Обоснование признаков радиолокационной классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2024. – № 12. – С. 187-197.

119. **Bolelov E. A., Galaeva K. I., Boyarenko E. S.** Algorithm for Classification of Dangerous Weather Phenomena “Rainfall-Thunderstorm-Hail “in the Airfield Mobile

Weather Radar Complex //2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – IEEE, 2024. – С. 1-5.

120. **Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И.** Анализ географической вариативности и временной изменчивости статистических характеристик отражаемости и турбулентности атмосферы для кучево-дождевой облачности на европейской территории России // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 139-152.

121. **Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И.** Расширение информационных возможностей метеорологических радиолокаторов в интересах повышения безопасности и регулярности полётов воздушных судов // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2025. – № 13. – С.3-13.

Приложения

Сравнение критериев классификации существующих метеорологических РЛС

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
<i>Ливневые конвективные облака и ливневые осадки</i>						
Пороговое значение отражаемости Z_1 на высоте H_1 от 0 до 2 км, dBZ	$\lg Z_1 = 0,0 \dots 1,1$ (ливень слабый)	в теплый период	$Z_1 \geq 28$ (ливень слабый)	в теплый период	От 10 до 40 (ливень слабый) От 20 до 45 (ливень умеренный) От 25 до 50 (ливень сильный)	все периоды
	$\lg Z_1 = 1,2 \dots 2,7$ (ливень умеренный)					
	$\lg Z_1 \geq 2,8$ (ливень сильный)					
	$\lg Z_1 = 0,4 \dots 1,9$	в холодный период				
	$\lg Z_1 < -0,4$ (осадки без определения интенсивности)	в холодный период				
Пороговое значение отражаемости Z_2 на высоте H_2 от 2 до 4 км, dBZ	$\lg Z_2 \geq 2,8$ (ливень сильный)	в теплый период	$Z_2 \geq 0$	все периоды	-	-
	$\lg Z_2 = -0,4 \dots 1,9$	в холодный период	$Z_2 \geq 37$ (ливень умеренный)			
	$\lg Z_2 < -0,4$ (осадки без определения интенсивности)	в холодный период	$Z_2 \geq 44$ (ливень сильный)			

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
Пороговое значение отражаемости Z_3 на высоте H_3 от 4 до 6 км, dBZ	$\lg Z_3 = 0,0 \dots 1,1$ (ливень без определения интенсивности)	в теплый период	-	-	-	-
<i>Грозоопасные конвективные облака и грозы</i>						
При отсутствии в радиусе 100-150 км от МРЛ пункта аэрологического зондирования:						
Высота верхней границы облачности ($H_{вг}$), м	$H \geq 5$ $H \geq H_3$ $H < H_3$	в теплый период	$H_{вг} = 6$ (Гроза вероятности 30 – 70 %) $H_{вг} = 7$ (Гроза вероятности 70 – 90 %) $H_{вг} = 8$ (Гроза вероятности более 90 %)	в теплый период	-	-
Пороговое значение отражаемости Z_1 на высоте H_1 от 0 до 2 км, dBZ	$\lg Z_1 \geq 1,2$	в холодный период	-	-	От 30 до 70	в холодный период
Пороговое значение	$\lg Z_2 \geq 1,8$	в теплый период	-	-	От 30 до 70	в холодный период

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
отражаемости Z_2 на высоте H_2 от 2 до 4 км, dBZ	$\lg Z_2 \geq 2,0$	в холодный период	-	-		
Пороговое значение отражаемости Z_3 на высоте H_3 от 4 до 6 км, dBZ	$\lg Z_3 \geq 1,2$	в теплый период	$Z_3 = 28$ (Гроза вероятности 30 – 70 %) $Z_3 = 34$ (Гроза вероятности 70 – 90 %) $Z_3 = 34$ (Гроза вероятности более 90 %)	в теплый период	-	-
Максимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H_3	-	-	-	-	От 50 до 70	в теплый период
Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H_3	-	-	-	-	От 10 до 40 (гроза вероятности 30 – 70 %) От 10 до 50 (гроза вероятности 71 – 90 %) От 10 до 60 (гроза вероятности более 90 %)	в теплый период

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
Комплексный критерий распознавания	$Y = H \cdot \lg Z_3$ 1) $Y = 9,0 \dots 12,9$ при $\Delta \lg Z_{2,3} = \lg Z_2 - \lg Z_3 < 1$ (Гроза вероятности 30 – 70 %) 2) $Y = 13,0 \dots 14,9$ при $\Delta \lg Z_{2,3} < 1$ (Гроза вероятности 70 – 90 %) 3) $Y \geq 15,0$ (Гроза вероятности более 90 %)	в теплый период	$Y = H \cdot \lg Z$ $Y = 200$ (Гроза вероятности 30 – 70 %) $Y = 310$ (Гроза вероятности 70 – 90 %) $Y = 320$ (Гроза вероятности более 90 %)	в теплый период	$Y = 0,001 \cdot H_{\text{вг}} \cdot Z_{\text{нз}}$ От 10 до 30 (гроза вероятности 30 – 70 %) От 10 до 40 (гроза вероятности 71 – 90 %) От 10 до 50 (гроза вероятности более 90 %)	в теплый период
	$Y = H \cdot \lg Z_2$ Для гроз, у которых $\lg Z_3$ занижена из-за ослабления радиоволн и поэтому Y рассчитывается по $\lg Z_2$, минимальное значение которого выбирается равным 1,8 1) $Y \geq 13,0$ (Гроза вероятности 30 – 70 %)					

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
	$Y = H \cdot \lg Z_2$ <p>Для гроз с $H < H_3$, у Y рассчитывается по $\lg Z_2$, минимальное значение, которого выбирается равным 1,8 1) $Y \geq 13,0$ (Гроза вероятности 30 – 70 %)</p>					
При наличии в радиусе 100-150 км от МРЛ пункта аэрологического зондирования – методом дискриминантного анализа:						
Высота верхней границы облачности ($H_{вг}$), м	$H > H_{22^\circ C}$, где $H_{22^\circ C} > 5,5$ км; $H > H_{22^\circ C}$, где $H_{22^\circ C} \leq 5,5$ км.	в теплый период	-	-	-	-
Пороговое значение отражаемости Z_2 на высоте H_2 от 2 до 4 км, dBZ	$\lg Z_2 \geq 1,8$	в теплый период	-	-	-	-

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
Пороговое значение отражаемости Z_3 на высоте H_3 от 4 до 6 км, dBZ	$\lg Z_3 \geq 1,2$	в теплый период	-	-	-	-
Комплексный критерий распознавания	$Y = H \cdot \lg Z_3$ или $Y = H \cdot \lg Z_2$ 1) Y от 9,0 до $u = 0$, где u - дискриминантная функция, зависящая от высоты изотермы -22°C (Гроза вероятности 30 – 70 %)	в теплый период	-	-	-	-
	2) Y от $u = 0$ до 12,9 (Гроза вероятности 70 – 90 %) 3) $Y \geq 13,0 \dots 15,0$ (Гроза вероятности более 90 %)		-	-	-	-
	$Y = H \cdot \lg Z_2$ Для гроз, у которых $\lg Z_3$ занижена из-за ослабления радиоволн и поэтому Y рассчитывается по		-	-	-	-

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
	lgZ ₂ , минимальное значение которого выбирается равным 1,8 1) Y > u = 0 (Гроза вероятности 30 – 70 %)					
<i>Градоопасные конвективные облака и град</i>						
Высота верхней границы облачности (Н_{вг}), м	N _{вг} ≥ 10	в теплый период	N _{вг} = 7 (Град слабый) N _{вг} = 7 (Град умеренный) N _{вг} = 8 (Град сильный)	в теплый период	-	-
Пороговое значение разности высот Н₃ и Н₀, м	-	-	-	-	ΔН = 1000...5000 м	в теплый период
Пороговое значение отражаемости Z₂ на высоте Н₂ от 2 до 4 км, dBZ	lg Z ₂ ≥ 2,8	в теплый период	-	-	-	-

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
Пороговое значение отражаемости Z_3 на высоте H_3 от 4 до 6 км, dBZ	$\lg Z_3 \geq 2,8$	в теплый период	$Z_3 = 40$ (Град слабый) $Z_3 = 40$ (Град умеренный) $Z_3 = 40$ (Град сильный)	в теплый период	-	-
Пороговое значение отражаемости Z_4 на высоте H_4 от 6 до 8 км, dBZ	$\lg Z_4 \geq 2,8$	в теплый период	-	-	-	-
Максимальное значение радиолокационной отражаемости на любом уровне	$\lg Z \geq 4,0$ $\lg Z \geq 3,7$ $\lg Z_{\text{ядра}} \geq 2,8$	в теплый период	$Z_{\text{max}} = 55$ (Град слабый) $Z_{\text{max}} = 60$ (Град умеренный) $Z_{\text{max}} = 65$ (Град сильный)	в теплый период	$Z_{\text{max}} = \text{от } 30 \text{ до } 50$ (град слабый) $Z_{\text{max}} = \text{от } 40 \text{ до } 60$ (град умеренный) $Z_{\text{max}} = \text{от } 40 \text{ до } 70$ (град сильный)	в теплый период
Комплексный критерий распознавания	1) На любом из уровней $\lg Z \geq 4,0$ 2) На любом из уровней $\lg Z \geq 3,7$ 3) Одновременно $\lg Z_2 = \lg Z_3 = \lg Z_4 \geq 2,8$	в теплый период	$Y = 100$ (Град слабый) $Y = 110$ (Град умеренный) $Y = 120$ (Град сильный)	в теплый период	-	-

Параметр	МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5		ДМРЛ-С		АМРЛК	
	<p>4) $Y = H \cdot \lg Z_3 \geq A$, где А зависит от географического района; А = 40, 35, 30 соответственно для Северного Кавказа, Средней Азии, Украины</p> <p>5) $H_{\lg Z_{\text{ядра}}} \geq 2,8 > (H_{0^{\circ}\text{C}} + 1.4 \text{ км})$ – высота «ядра» РКО превышает высоту нулевой изотермы на 1,4 км.</p>					

Фрагменты баз данных экспериментального исследования, полученных при помощи АМРЛК

Таблица Б.1 – Фрагмент экспериментальных данных радиолокационной отражаемости ливней

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Z_{max}	10,94	25,03	26	20,67	21,43	20,41	13,61	0			
2		8,66	24,39	25,77	26,94	23,98	23,19	17,41	11,67	0		
3		12,18	24,82	29,59	24,5	21,69	19,11	8,94	0			
4		4,08	22,3	23,18	23,91	22,47	15,65	6,7	0			
5		8,31	25,44	24,95	24,66	21,58	18,39	11,43	0			
6		17,02	27,45	30,58	27,92	26,11	20,6	13,66	0			
7		17,33	28,45	29,84	27,49	26,28	22,86	14,33	0			
8		12,83	26,12	26,59	26,17	21,93	20,48	13,24	3,56	0		
9		14,53	28,59	28	26,24	21,63	22,18	13,83	0			
10		19,1	29,92	30,42	27,6	23,55	22,18	13,83	0			
...	
50		9,11	24,57	24,25	21,18	13,31	0					

Таблица Б.2 - Фрагмент экспериментальных данных удельной скорости диссипации турбулентной энергии

ливней

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	EDR_{max}	0,098	0,595	0,269	0,649	0,286	0,158	0				
2		0,12480	0,24260	0,27930	0,36240	0,34980	0,32160	0,27260	0	0		
3		0,15350	0,25960	0,23600	0,29360	0,29440	0,21520	0,00000				
4		0,06460	0,14940	0,24990	0,26500	0,28840	0,26470	0,14590	0			
5		0,08980	0,17200	0,19300	0,40060	0,25010	0,22640	0,12980	0			
6		0,18020	0,24990	0,35920	0,42610	0,45550	0,32640	0,10990	0			
7		0,19270	0,24000	0,29470	0,37970	0,44960	0,29720	0,11950	0			
8		0,11410	0,21560	0,24220	0,29070	0,32420	0,51690	0,13070	0			
9		0,12420	0,19600	0,21260	0,31950	0,52640	0,44410	0,53100	0			
10		0,19180	0,36850	0,34400	0,39490	0,49690	0,40340	0,12000	0			
...	
50		0,1161	0,2080	0,2444	0,2304	0,1623	0,0127	0				

Таблица Б.3 – Фрагмент экспериментальных данных радиолокационной отражаемости гроз

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Z _{max}	10,43	30	28,73	32,21	31,75	28,66	29,36	25,2	21,93	14,79	0	
2		14,13	29,24	33,29	33,51	28,47	30,32	30,43	26,78	23,59	19,8	14,31	0
3		20,32	35,43	33,29	34,66	35,3	34,89	33,14	32,41	28,06	20,04	1,61	0
4		13,27	33,81	34,08	33,15	31,54	28,46	26,59	21,53	11,72	0		
5		14,08	31,29	31,89	31,58	29,55	28,98	27,89	25,62	17,07	0		
6		25,99	32,66	29,13	32,38	35,55	33,1	28,45	22,97	7,28	0		
7		24,86	32,89	34,44	37,14	37,92	35,11	31,57	26,49	16,46	0		
8		28,87	38,14	38,5	37,74	38,43	37,21	35,41	33,58	27,3	17,28	0	
9		30,27	41,43	41,02	40,87	38,24	37,21	34,1	28,68	25,41	14,57	0	
10		22,95	38,85	41,39	37,22	37,96	32,65	28,46	22,15	8,28	0		
...
25		26,36	42,97	41,96	41,46	38,78	33,5	30,05	26,13	21,48	17,65	9,06	0

Таблица Б.4 - Фрагмент экспериментальных данных удельной скорости диссипации турбулентной энергии гроз

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	EDR _{max}	0,2631	0,5381	0,5382	0,5379	0,5386	0,5294	0,4487	0,4957	0,5307	0,3506	0	
2		0,3495	0,5201	0,511	0,5269	0,514	0,5453	0,6145	0,5706	0,4995	0,4558	0,3436	0
3		0,4243	0,5786	0,5098	0,4995	0,541	0,6254	0,6171	0,6588	0,6246	0,566	0,1711	0
4		0,2272	0,4936	0,5258	0,5607	0,5613	0,6551	0,6822	0,6031	0,2021	0		
5		0,2399	0,5259	0,6525	0,5168	0,5706	0,5911	0,5501	0,5128	0,1058	0		
6		0,2731	0,5174	0,5144	0,4799	0,5482	0,5854	0,6084	0,9869	0,2466	0		
7		0,408	0,3261	0,4662	0,5033	0,6343	0,5686	0,5679	0,6062	0,5851	0		
8		0,3692	0,3896	0,5782	0,485	0,6274	0,5778	0,6764	0,6003	0,6045	0,5959	0	
9		0,4712	0,5817	0,4424	0,6178	0,5822	0,5686	0,6165	0,6508	0,6639	0,4097	0	
10		0,321	0,4221	0,4487	0,5312	0,4825	0,5045	0,4839	0,415	0,1922	0		
...
25		0,2705	0,4301	0,4683	0,4859	0,4773	0,5103	0,4993	0,4353	0,3788	0,2305	0,1388	0

Таблица Б.5 - Фрагмент экспериментальных данных радиолокационной отражаемости града

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Zmax	28,77	39,32	43,4	44,27	42,97	46,13	46,68	44,04	37,86	30,83	23	18,4	0,8451	0			
2		28,62	37,7	44,41	45,7	45,55	46,55	41,88	36,28	31,02	25,99	18,32	3,3	0				
3		30,16	43,06	44,36	45,51	46,05	44,14	41,04	36,5	27,77	25,23	16,25	1,17	0				
4		36,8	45,27	46,56	47,89	47,07	47,14	43,39	39,15	34,6	27,12	20,5	9,04	0				
5		40,21	47,68	48,02	49,98	48,64	49,48	47,56	41,23	37,13	32,48	26,95	22,07	0				
6		41,14	48,82	49,31	49,7	49,8	50,09	45,58	39,55	32,55	20,86	10,37	0					
7		42,26	47,58	48,98	50,4	48,51	48,16	45,69	43,66	35,01	28,3	23,8	0					
8		40,03	49,14	46	48,31	46,65	44,78	43,99	40,71	36,1	29,04	12,63	0					
9		41,91	46,93	44,69	45,75	47,27	47,95	46,63	44,19	37,82	31,84	22,18	11,34	0				
10		5,85	43,72	45,39	47,5	49,13	46,81	47,06	47	45,12	40,21	37,12	32,45	29,93	18,81	0		
...
25		25,86	42,42	44,47	45,67	45,69	47	48,56	49,35	50,2	48,9	50,79	50,39	48,12	42,67	34,52	23,22	9,48

Таблица Б.6 - Фрагмент экспериментальных данных удельной скорости диссипации турбулентной энергии града

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	EDRmax	0,4248	0,5554	0,6745	0,6847	0,6556	0,6369	0,6597	0,5788	0,6279	0,6507	0,6594	0,5592	0,1831	0			
2		0,4246	0,5543	0,6153	0,6102	0,5847	0,5487	0,6218	0,6531	0,6776	0,5859	0,5629	0,0469	0				
3		0,4178	0,6258	0,6005	0,5483	0,5722	0,5587	0,5438	0,6633	0,6235	0,5479	0,0916	0					
4		0,5335	0,6146	0,6193	0,5741	0,5717	0,6466	0,6864	0,5804	0,6792	0,6097	0,1108	0					
5		0,569	0,5336	0,5979	0,6005	0,6346	0,5289	0,5406	0,5937	0,5611	0,625	0,6805	0,5628	0				
6		0,5418	0,6198	0,5748	0,6048	0,6889	0,6455	0,6415	0,6568	0,6472	0,5714	0,2443	0					
7		0,5184	0,5824	0,6264	0,6383	0,6452	0,6648	0,5832	0,6594	0,6282	0,608	0,4148	0					
8		0,613	0,5949	0,6521	0,6904	0,6537	0,6484	0,6309	0,5976	0,6477	0,6567	0,5413	0					
9		0,6231	0,6858	0,7103	0,583	0,6511	0,7143	0,627	0,6388	0,618	0,5705	0,6055	0,3134	0				
10		0,1744	0,6127	0,6491	0,6738	0,8533	0,725	0,663	0,6864	0,6719	0,6644	0,653	0,66	0,6694	0,4479	0		
...
25		0,4872	0,6373	0,6761	0,6431	0,6622	0,6417	0,6452	0,717	0,6917	0,7194	0,7685	0,7332	0,7527	0,6452	0,6879	0,6379	0,365

Расчет вероятностей обнаружения

1. Расчет вероятностей обнаружения для одномерных плотностей распределения вероятностей

Радиолокационная отражаемость - Z_{\max}

Решение уравнений:

1) Порог 1: $f_{\text{Л}}(x) = f_{\text{ГЗ}}(x)$

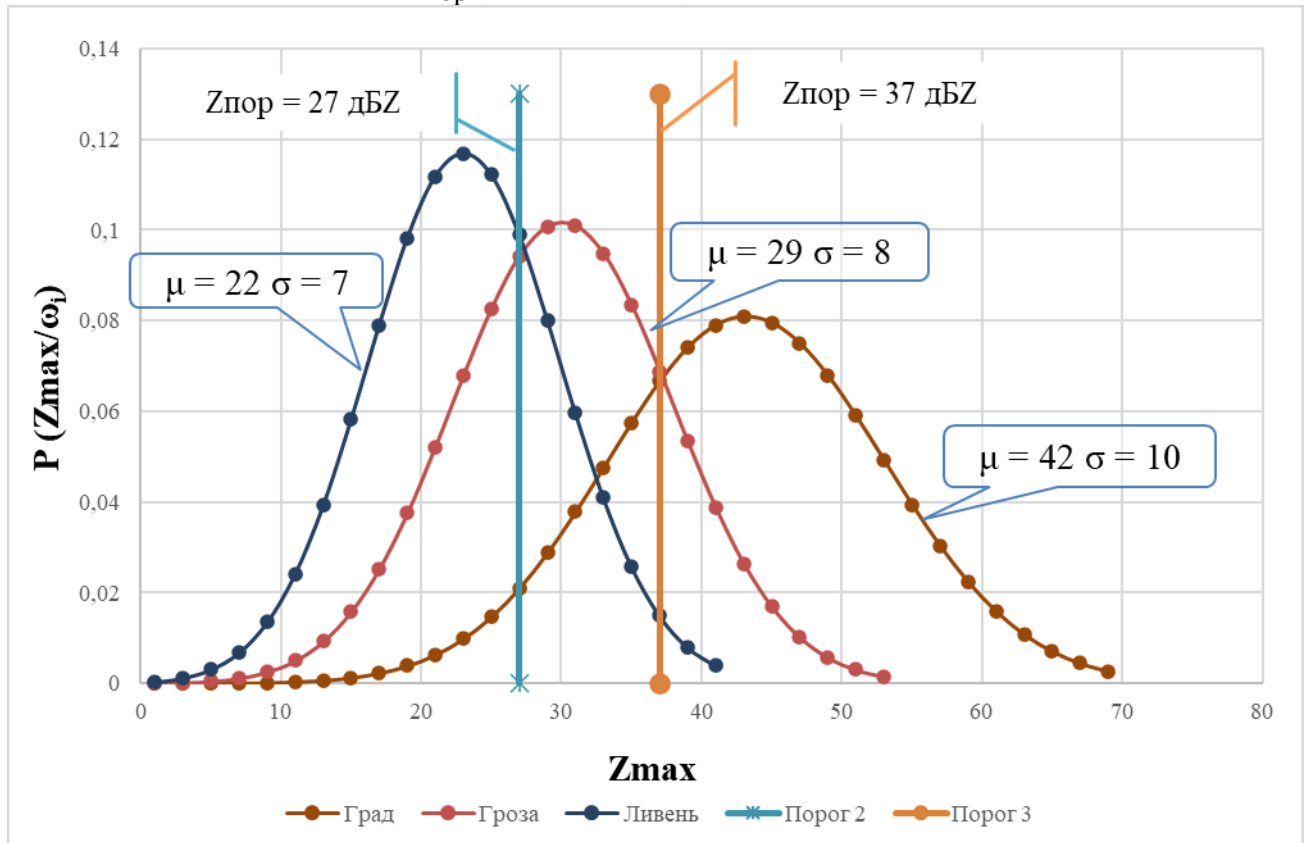
$$H_{\text{пор}} = \frac{x}{72} e^{-\frac{x^2+22^2}{2 \cdot 7^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 22}{7^2}\right) - \frac{x}{8^2} e^{-\frac{x^2+29^2}{2 \cdot 8^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 29}{8^2}\right) = 0$$

$$H_{\text{пор}}(\text{Ливень/Гроза}) = 27.357$$

2) Порог 2: $f_{\text{ГЗ}}(x) = f_{\text{ГД}}(x)$

$$H_{\text{пор}} = \frac{x}{8^2} e^{-\frac{x^2+29^2}{2 \cdot 8^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 29}{8^2}\right) - \frac{x}{10^2} e^{-\frac{x^2+42^2}{2 \cdot 10^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 42}{10^2}\right) = 0$$

$$H_{\text{пор}}(\text{Гроза/Град}) = 37.186$$



$$P_{\text{Л,Л}} = \int_0^{27} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{27} \frac{\frac{x}{72} e^{-\frac{x^2+22^2}{2 \cdot 7^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 22}{7^2}\right) * 2}{2} dx = 0,715$$

$$P_{\text{Л,ГЗ}} = \int_{27}^{37} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{37} \frac{\frac{x}{72} e^{-\frac{x^2+22^2}{2 \cdot 7^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 22}{7^2}\right) * 2}{2} dx = 0,263$$

$$P_{Л,ГД} = \int_{37}^{70} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{70} \frac{\frac{x}{72} e^{-\frac{x^2+22^2}{2*72^2}} I_0\left(\frac{x*22}{72}\right) * 2}{2} dx = 0,022$$

$$P_{ЛЛ} + P_{Л,ГЗ} + P_{Л,ГД} = 0,715 + 0,263 + 0,022 = 1$$

$$P_{ГЗ,Л} = \int_0^{27} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{27} \frac{\frac{x}{82} e^{-\frac{x^2+29^2}{2*82^2}} I_0\left(\frac{x*29}{82}\right) * 2}{2} dx = 0,347$$

$$P_{ГЗ,ГЗ} = \int_{27}^{37} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{37} \frac{\frac{x}{82} e^{-\frac{x^2+29^2}{2*82^2}} I_0\left(\frac{x*29}{82}\right) * 2}{2} dx = 0,463$$

$$P_{ГЗ,ГД} = \int_{27}^{70} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{70} \frac{\frac{x}{82} e^{-\frac{x^2+29^2}{2*82^2}} I_0\left(\frac{x*29}{82}\right) * 2}{2} dx = 0,19$$

$$P_{ГЗ,Л} + P_{ГЗ,ГЗ} + P_{ГЗ,ГД} = 0,347 + 0,463 + 0,19 = 0,999$$

$$P_{ГД,Л} = \int_0^{27} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{27} \frac{\frac{x}{102} e^{-\frac{x^2+42^2}{2*102^2}} I_0\left(\frac{x*42}{102}\right) * 2}{2} dx = 0,05$$

$$P_{ГД,ГЗ} = \int_{27}^{37} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{37} \frac{\frac{x}{102} e^{-\frac{x^2+42^2}{2*102^2}} I_0\left(\frac{x*42}{102}\right) * 2}{2} dx = 0,218$$

$$P_{ГД,ГД} = \int_{27}^{70} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{27}^{70} \frac{\frac{x}{102} e^{-\frac{x^2+42^2}{2*102^2}} I_0\left(\frac{x*42}{102}\right) * 2}{2} dx = 0,732$$

$$P_{ГД,Л} + P_{ГД,ГЗ} + P_{ГД,ГД} = 0,05 + 0,215 + 0,732 = 0,997$$

Рассчитанные вероятности:

$$P(Z_{max}) = \begin{vmatrix} 0,715 & 0,263 & 0,022 \\ 0,347 & 0,463 & 0,19 \\ 0,05 & 0,218 & 0,732 \end{vmatrix}$$

Высота по радиолокационной отражаемости – $H(Z_{max})$

Решение уравнений:

1) Порог 1: $f_L(x) = f_{ГЗ}(x)$

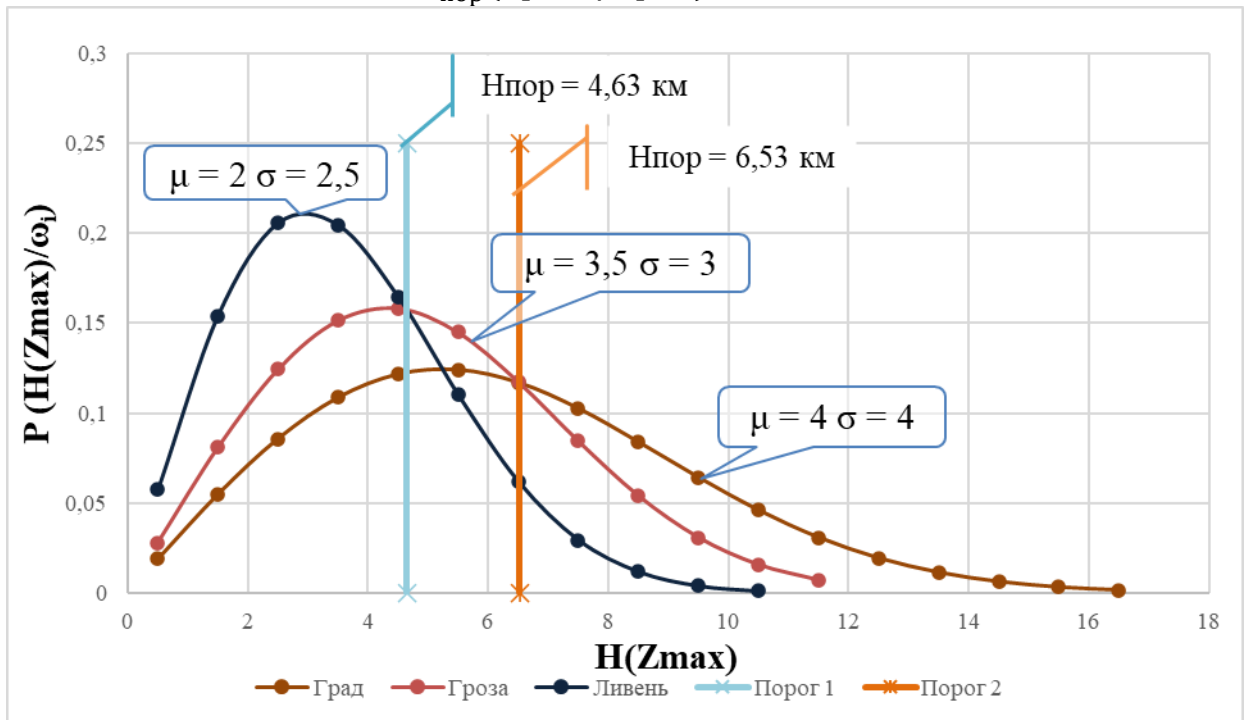
$$H_{пор} = \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2 \cdot 2.5^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 2}{2.5^2}\right) - \frac{x}{3^2} e^{-\frac{x^2+3.5^2}{2 \cdot 3^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 3.5}{3^2}\right) = 0$$

$$H_{пор}(\text{Ливень/Гроза}) = 4.63$$

2) Порог 2: $f_{ГЗ}(x) = f_{ГД}(x)$

$$H_{пор} = \frac{x}{3^2} e^{-\frac{x^2+3.5^2}{2 \cdot 3^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 3.5}{3^2}\right) - \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2 \cdot 4^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 4}{4^2}\right) = 0$$

$$H_{пор}(\text{Гроза/Град}) = 6.53$$



$$P_{Л,Л} = \int_0^{4.63} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{4.63} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2 \cdot 2.5^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 2}{2.5^2}\right) dx = 0,759$$

$$P_{Л,ГЗ} = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2 \cdot 2.5^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 2}{2.5^2}\right) dx = 0,153$$

$$P_{Л,ГД} = \int_{6.53}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.53}^{16} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2 \cdot 2.5^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 2}{2.5^2}\right) dx = 0,088$$

$$P_{ЛЛ} + P_{Л,ГЗ} + P_{Л,ГД} = 0,759 + 0,153 + 0,088 = 1$$

$$P_{ГЗ,Л} = \int_0^{4.63} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{4.63} \frac{x}{3^2} e^{-\frac{x^2+3.5^2}{2 \cdot 3^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 3.5}{3^2}\right) dx = 0,518$$

$$P_{ГЗ,ГЗ} = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{3^2} e^{-\frac{x^2+3.5^2}{2 \cdot 3^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 3.5}{3^2}\right) dx = 0,205$$

$$P_{\Gamma_3, \Gamma_D} = \int_{6.53}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.53}^{16} \frac{x}{3^2} e^{-\frac{x^2+3.5^2}{2*3^2}} I_0\left(\frac{x*3.5}{3^2}\right) dx = 0,277$$

$$P_{\Gamma_3, \Gamma_L} + P_{\Gamma_3, \Gamma_3} + P_{\Gamma_3, \Gamma_D} = 0,518 + 0,205 + 0,277 = 1$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_L} = \int_0^{4.63} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{4.63} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4^2}\right) dx = 0,374$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_3} = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{4.63}^{6.53} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4^2}\right) dx = 0,177$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_D} = \int_{6.3}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.3}^{16} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4^2}\right) dx = 0,449$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_L} + P_{\Gamma_D, \Gamma_3} + P_{\Gamma_D, \Gamma_D} = 0,374 + 0,177 + 0,449 = 1$$

Рассчитанные вероятности:

$$P(H(Z_{max})) = \begin{vmatrix} 0,759 & 0,153 & 0,088 \\ 0,518 & 0,205 & 0,277 \\ 0,374 & 0,177 & 0,449 \end{vmatrix}.$$

Турбулентность - EDR_{max}

Решение уравнений:

– Порог 1: $f_L(x) = f_{\Gamma_3}(x)$

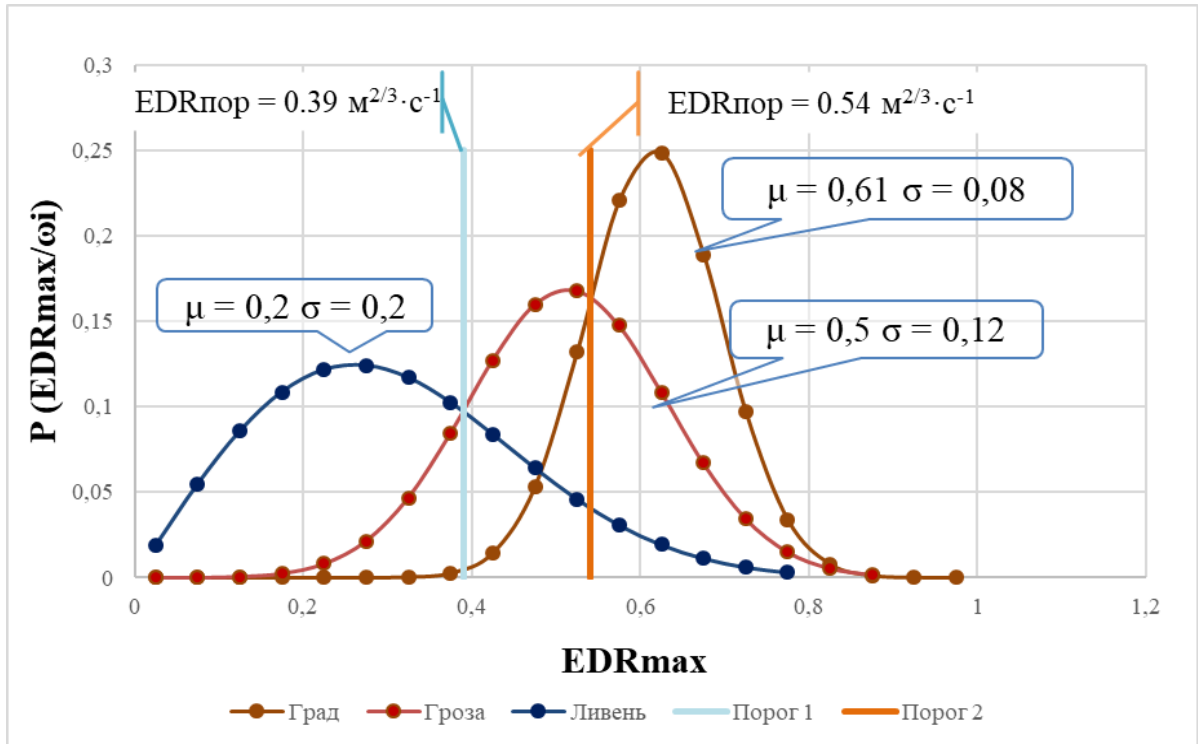
$$H_{\text{пор}} = \frac{x}{0.2^2} e^{-\frac{x^2+0.2^2}{2*0.2^2}} I_0\left(\frac{x*0.2}{0.2^2}\right) - \frac{x}{0.12^2} e^{-\frac{x^2+0.5^2}{2*0.12^2}} I_0\left(\frac{x*0.5}{0.12^2}\right) = 0$$

$$H_{\text{пор}}(\text{Ливень/Гроза}) = 0.39$$

– Порог 2: $f_{\Gamma_3}(x) = f_{\Gamma_D}(x)$

$$H_{\text{пор}} = \frac{x}{0.12^2} e^{-\frac{x^2+0.5^2}{2*0.12^2}} I_0\left(\frac{x*0.5}{0.12^2}\right) - \frac{x}{0.08^2} e^{-\frac{x^2+0.61^2}{2*0.08^2}} I_0\left(\frac{x*0.61}{0.08^2}\right) = 0$$

$$H_{\text{пор}}(\text{Гроза/Град}) = 0.542$$



$$\begin{aligned}
 P_{Л,Л} &= \int_0^{0.39} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_0^{0.39} \frac{x}{0.2^2} e^{-\frac{x^2+0.2^2}{2*0.2^2}} I_0\left(\frac{x*0.2}{0.2^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,712 \\
 P_{Л,ГЗ} &= \int_{0.39}^{0.54} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_{0.39}^{0.54} \frac{x}{0.2^2} e^{-\frac{x^2+0.2^2}{2*0.2^2}} I_0\left(\frac{x*0.2}{0.2^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,205 \\
 P_{Л,ГД} &= \int_{0.54}^1 \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{0.54}^1 \frac{x}{0.2^2} e^{-\frac{x^2+0.2^2}{2*0.2^2}} I_0\left(\frac{x*0.2}{0.2^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx \\
 &= 0,083
 \end{aligned}$$

$$P_{ЛЛ} + P_{Л,ГЗ} + P_{Л,ГД} = 0,712 + 0,205 + 0,083 = 1$$

$$\begin{aligned}
 P_{ГЗ,Л} &= \int_0^{4.65} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_0^{0.39} \frac{x}{0.12^2} e^{-\frac{x^2+0.5^2}{2*0.12^2}} I_0\left(\frac{x*0.5}{0.12^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,146 \\
 P_{ГЗ,ГЗ} &= \int_{4.65}^{6.53} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_{0.39}^{0.54} \frac{x}{0.12^2} e^{-\frac{x^2+0.5^2}{2*0.12^2}} I_0\left(\frac{x*0.5}{0.12^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,44
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Gamma_3, \Gamma_D} &= \int_{6.53}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_{0.54}^1 \frac{x}{0.12^2} e^{-\frac{x^2+0.5^2}{2*0.12^2}} I_0\left(\frac{x*0.5}{0.12^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,414
 \end{aligned}$$

$$P_{\Gamma_3, \Gamma_L} + P_{\Gamma_3, \Gamma_3} + P_{\Gamma_3, \Gamma_D} = 0,146 + 0,44 + 0,414 = 1$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Gamma_D, \Gamma_L} &= \int_0^{4.65} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_0^{4.65} \frac{x}{0.08^2} e^{-\frac{x^2+0.61^2}{2*0.08^2}} I_0\left(\frac{x*0.61}{0.08^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,002
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Gamma_D, \Gamma_3} &= \int_{4.65}^{6.53} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_{4.65}^{6.53} \frac{x}{0.08^2} e^{-\frac{x^2+0.61^2}{2*0.08^2}} I_0\left(\frac{x*0.61}{0.08^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,17
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Gamma_D, \Gamma_D} &= \int_{6.53}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx \\
 &= \int_{6.53}^{16} \frac{x}{0.08^2} e^{-\frac{x^2+0.61^2}{2*0.08^2}} I_0\left(\frac{x*0.61}{0.08^2}\right) * \frac{1}{20} * 20 dx = 0,828
 \end{aligned}$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_L} + P_{\Gamma_D, \Gamma_3} + P_{\Gamma_D, \Gamma_D} = 0,002 + 0,17 + 0,828 = 1$$

Рассчитанные вероятности:

$$P(EDR_{max}) = \begin{vmatrix} 0,712 & 0,205 & 0,083 \\ 0,146 & 0,440 & 0,414 \\ 0,002 & 0,170 & 0,828 \end{vmatrix}$$

Высота по турбулентности Н(EDR_{max})

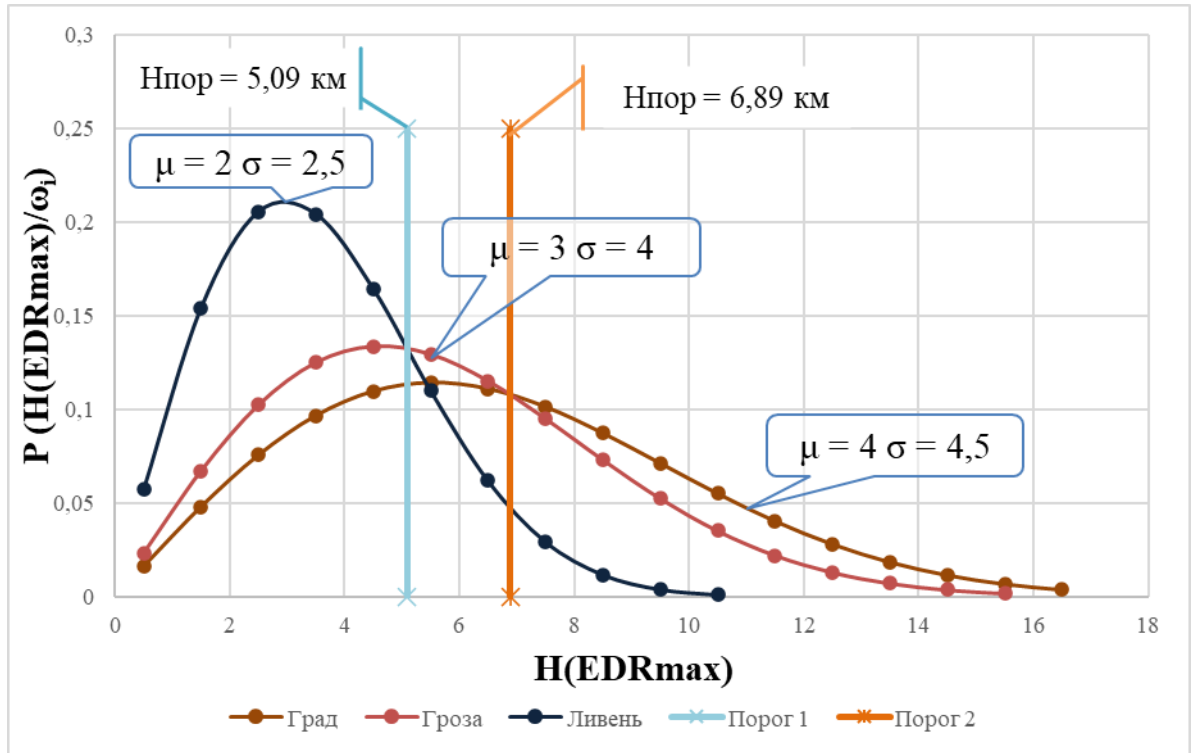
Решение уравнений:

1) Порог 1: $f_L(x) = f_{\Gamma_3}(x)$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{пор}} &= \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2*2.5^2}} I_0\left(\frac{x*2}{2.5^2}\right) - \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+3^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*3}{4^2}\right) = 0 \\
 H_{\text{пор}}(\text{Ливень/Гроза}) &= 5.09
 \end{aligned}$$

2) Порог 2: $f_{\Gamma_3}(x) = f_{\Gamma_D}(x)$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{пор}} &= \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+3^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*3}{4^2}\right) - \frac{x}{4.5^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4.5^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4.5^2}\right) = 0 \\
 H_{\text{пор}}(\text{Гроза/Град}) &= 6.89
 \end{aligned}$$



$$P_{Л,Л} = \int_0^{5.09} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{5.09} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2*2.5^2}} I_0\left(\frac{x*2}{2.5^2}\right) dx = 0,791$$

$$P_{Л,ГЗ} = \int_{5.09}^{6.89} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{5.09}^{6.89} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2*2.5^2}} I_0\left(\frac{x*2}{2.5^2}\right) dx = 0,156$$

$$P_{Л,ГД} = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{2.5^2} e^{-\frac{x^2+2^2}{2*2.5^2}} I_0\left(\frac{x*2}{2.5^2}\right) dx = 0,053$$

$$P_{ЛЛ} + P_{Л,ГЗ} + P_{Л,ГД} = 0,791 + 0,156 + 0,053 = 1$$

$$P_{ГЗ,Л} = \int_0^{5.09} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{5.09} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+3^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*3}{4^2}\right) dx = 0,463$$

$$P_{ГЗ,ГЗ} = \int_{5.09}^{6.89} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{5.09}^{6.89} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+3^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*3}{4^2}\right) dx = 0,22$$

$$P_{ГЗ,ГД} = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{4^2} e^{-\frac{x^2+3^2}{2*4^2}} I_0\left(\frac{x*3}{4^2}\right) dx = 0,317$$

$$P_{ГЗ,Л} + P_{ГЗ,ГЗ} + P_{ГЗ,ГД} = 0,463 + 0,22 + 0,317 = 1$$

$$P_{ГД,Л} = \int_0^{5.11} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_0^{5.11} \frac{x}{4.5^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4.5^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4.5^2}\right) dx = 0,359$$

$$P_{ГД,ГЗ} = \int_{5.11}^{6.89} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{5.11}^{6.9} \frac{x}{4.5^2} e^{-\frac{x^2+4^2}{2*4.5^2}} I_0\left(\frac{x*4}{4.5^2}\right) dx = 0,208$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_D} = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + M^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xM}{\sigma^2}\right) dx = \int_{6.89}^{16} \frac{x}{4.5^2} e^{-\frac{x^2 + 4^2}{2 \cdot 4.5^2}} I_0\left(\frac{x \cdot 4}{4.5^2}\right) dx = 0.433$$

$$P_{\Gamma_D, \Gamma_L} + P_{\Gamma_D, \Gamma_Z} + P_{\Gamma_D, \Gamma_D} = 0,359 + 0,208 + 0,433 = 1$$

Рассчитанные вероятности:

$$P(H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} 0,791 & 0,156 & 0,053 \\ 0,463 & 0,220 & 0,317 \\ 0,359 & 0,208 & 0,433 \end{vmatrix}$$

2. Расчет вероятностей классификации ОМЯ КДО в многомерном признаковом пространстве

2.1 Входные данные

```
from input_data import*
import numpy as np
import xlrd
from typing import Callable

def get_threshold_legend(columns: tuple) -> tuple or None:
    # Открываем эксель файл
    workbook = xlrd.open_workbook(EXCEL_FILE_NAME)
    worksheet = workbook.sheet_by_name('data')

    if worksheet.nrows < 2 and len(columns) == 2 and worksheet.ncols < columns[1]:
        return None # Проверка входных данных и эксель файла. Если не пройдена то провал

    return worksheet.cell(0, columns[0]).value, [worksheet.cell(1, columns[0]).value,
                                                worksheet.cell(1, columns[1]).value]

def get_threshold_values(column_x: int, column_y: int) -> np.array:
    # Открываем эксель файл
    workbook = xlrd.open_workbook(EXCEL_FILE_NAME)
    worksheet = workbook.sheet_by_name('data')

    if worksheet.nrows < 2 and worksheet.ncols > column_y and worksheet.ncols > column_x:
        return None # Проверка входных данных и эксель файла. Если не пройдена то провал

        out_list = [] # Массив для накопления данных с текущих колонн

    for step in range(2, worksheet.nrows):
        next_val = [worksheet.cell(step, column_x).value, worksheet.cell(step, column_y).value]

    if next_val[0] == '': # Если данные закончились раньше
        break
        out_list += [next_val]
    return np.array(list(reversed(out_list)))
```

```

def check_affiliation(curves: np.array):
    x, y = curves[:, 0], curves[:, 1]

    if x[0] > x[1]:
        x = np.flip(x, 0)
        y = np.flip(y, 0)

    max_x = np.max(curves[:, 0])
    min_x = np.min(curves[:, 0])
    max_y = np.max(curves[:, 1])
    min_y = np.min(curves[:, 1])

    def func_check_affiliation(x_val: float, y_val: float):
        #
        # y_val = 29
        # x_val = 6.3

        if x_val <= min_x or y_val <= min_y:
            return False

        if x_val >= max_x or y_val >= max_y:
            return True

        interp_val = np.interp(x_val, x, y)

        return interp_val < y_val

    return func_check_affiliation

def get_distribution_density(mean_val: float, dispersion_val: float):
    val_bessel = mean_val / dispersion_val
    mean_sqr = np.square(mean_val)

```

```

def density_function(x: float):
    val_exp =- (np.square(x) + mean_sqr) /2./ dispersion_val
    out_val = x / dispersion_val * np.exp(val_exp) * np.i0(x * val_bessel) *2
return out_val

return density_function

def get_distribution_density2D(mean_val: list, dispersion_val: list):

if len(mean_val) !=2 or len(dispersion_val) !=2:
print("alg.get_distribution_density2D: Плохой ввод")
    quit()

    density0 = get_distribution_density(mean_val[0], dispersion_val[0])
    density1 = get_distribution_density(mean_val[1], dispersion_val[1])

def density_function2D(x: float, y:float):
return density0(x) * density1(y)

return density_function2D

def calculate_volume_parts(func_density: Callable, affiliation: Callable, boundaries: tuple, num_partitions: tuple):
if len(num_partitions) !=2 or len(boundaries) !=2:
print("alg.calculate_volume_parts: Плохой ввод")
    quit()

    delta_r_X = (boundaries[0][1] - boundaries[0][0]) / (num_partitions[0])
    delta_r_Y = (boundaries[1][1] - boundaries[1][0]) / (num_partitions[1])

    x_values = np.arange(boundaries[0][0] + delta_r_X/2, boundaries[0][1], delta_r_X)
    y_values = np.arange(boundaries[1][0] + delta_r_Y/2, boundaries[1][1], delta_r_Y)

    area_val = (x_values[1] - x_values[0]) * (y_values[1] - y_values[0])

    inner_volume =0
    outer_volume =0

```

```

for x_val in x_values:
for y_val in y_values:
    delta_volume = area_val * func_density(x_val, y_val)

if affiliation(x_val, y_val):
    inner_volume += delta_volume
else:
    outer_volume += delta_volume

return outer_volume, inner_volume

def get_surface(func_density: Callable, affiliation: Callable, boundaries: tuple, num_partitions: tuple):
if len(num_partitions) != 2 or len(boundaries) != 2:
print("alg.calculate_volume_parts: Плохой ввод")
    quit()

    delta_r_X = (boundaries[0][1] - boundaries[0][0]) / (num_partitions[0])
    delta_r_Y = (boundaries[1][1] - boundaries[1][0]) / (num_partitions[1])

    x_values = np.arange(boundaries[0][0] + delta_r_X/2, boundaries[0][1], delta_r_X)
    y_values = np.arange(boundaries[1][0] + delta_r_Y/2, boundaries[1][1], delta_r_Y)

    vals = np.zeros([num_partitions[0], num_partitions[1]])
    colors = np.zeros([num_partitions[0], num_partitions[1]])

for step_x in range(len(x_values)):
for step_y in range(len(y_values)):
    vals[step_x, step_y] = func_density(x_values[step_x], y_values[step_y])
    colors[step_x, step_y] = affiliation(x_values[step_x], y_values[step_y])

return vals.transpose(), colors.transpose()

```

2.2 Построение двумерных плотностей и порогов

```

# Эксель файл с двумерными порогам, заданными в виде массивов точек
EXCEL_FILE_NAME = "thresholds.xls"

```

```

# Описание анализируемых продуктов и классов
CLASSES = ("rain", "thunder", "hail")
CLASSES_DESCR = {"rain": "Дождь", "thunder": "Гроза", "hail": "Град"}
PRODUCTS = ("Zmax", "HZmax", "EDRmax", "HEDRmax")
PRODUCTS_DESCR = {"Zmax": "Максимальная радиолокационная отражаемость",
"HZmax": "Высота максимальной радиолокационной отражаемости",
"EDRmax": "Максимальная удельная скорость диссипации турбулентной энергии",
"HEDRmax": "Высота максимальной удельной скорости диссипации турбулентной энергии"}

# Статистические параметры (ключи словарей соответствуют значениям в листах PRODUCTS)
# Математические ожидания
M = {"Zmax": {"rain": 22., "thunder": 29., "hail": 42.},
"HZmax": {"rain": 2., "thunder": 3.5, "hail": 4.},
"EDRmax": {"rain": 0.2, "thunder": 0.5, "hail": 0.61},
"HEDRmax": {"rain": 2., "thunder": 3., "hail": 4.}}

# Дисперсия (квадрат СКО)
D = {"Zmax": {"rain": 7.**2, "thunder": 8.**2, "hail": 10.**2},
"HZmax": {"rain": 2.5**2, "thunder": 3.**2, "hail": 4.**2},
"EDRmax": {"rain": 0.2**2, "thunder": 0.12**2, "hail": 0.08**2},
"HEDRmax": {"rain": 2.5**2, "thunder": 4.**2, "hail": 4.5**2}}

# Граничные значения для продуктов при расчете вероятностей по плотности
boundaries = {"Zmax": (-10., 80.), "HZmax": (0., 20.), "EDRmax": (0., 0.9), "HEDRmax": (0., 14.)}

# Число элементов разбиения диапазона по каждому продукту, чем больше значений, тем точнее и дольше считается
# num_elements = {"Zmax": 45, "HZmax": 50, "EDRmax": 20, "HEDRmax": 20}
num_elements = {"Zmax": 100, "HZmax": 110, "EDRmax": 100, "HEDRmax": 90}

```

2.3 Построение графиков двумерных плотностей и порогов

```

from alg import*
import matplotlib.pyplot as plt

str_class = 'thunder' # Выбор класса - 'rain' / 'hail' / 'thunder'
PLOT_Zmax = True # Выбор продукта - True для отражаемости, False для ЕДР

if PLOT_Zmax:
    str_xval = 'HZmax'

```

```

    str_yval = 'Zmax'
    threshold_rain_thunder = get_threshold_values(0, 1)
    threshold_thunder_hail = get_threshold_values(2, 3)
else:
    str_xval = 'HEDRmax'
    str_yval = 'EDRmax'
    threshold_rain_thunder = get_threshold_values(4, 5)
    threshold_thunder_hail = get_threshold_values(6, 7)

func_affiliation_rain_thunder = check_affiliation(threshold_rain_thunder)
func_affiliation_thunder_hail = check_affiliation(threshold_thunder_hail)

func_density = get_distribution_density2D([M[str_xval][str_class], M[str_yval][str_class]],
                                          [D[str_xval][str_class], D[str_yval][str_class]])

fig, ax = plt.subplots(subplot_kw={"projection": "3d"})
vals, colors_th = get_surface(func_density, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries[str_xval],
                                                                           boundaries[str_yval]), (num_elements[str_xval], num_elements[str_yval]))
_, colors_h = get_surface(func_density, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries[str_xval],
                                                                           boundaries[str_yval]), (num_elements[str_xval], num_elements[str_yval]))

X = np.linspace(*boundaries[str_xval], num_elements[str_xval])
Y = np.linspace(*boundaries[str_yval], num_elements[str_yval])

delta_r_X = (boundaries[str_xval][1] - boundaries[str_xval][0]) / (num_elements[str_xval])
delta_r_Y = (boundaries[str_yval][1] - boundaries[str_yval][0]) / (num_elements[str_yval])

x_values = np.arange(boundaries[str_xval][0] + delta_r_X / 2, boundaries[str_xval][1], delta_r_X)
y_values = np.arange(boundaries[str_yval][0] + delta_r_Y / 2, boundaries[str_yval][1], delta_r_Y)

Xarr, Yarr = np.meshgrid(X, Y)

ax.plot_surface(Xarr, Yarr, vals, vmin=vals.min() * 2, cmap='jet')

X_T1 = np.array([threshold_rain_thunder[:, 0], (threshold_rain_thunder[:, 0])])
Y_T1 = np.array([threshold_rain_thunder[:, 1], (threshold_rain_thunder[:, 1])])
Z_T1 = np.array([[0] * X_T1.shape[1], [vals.max()] * X_T1.shape[1]])
ax.plot_surface(X_T1, Y_T1, Z_T1, alpha=0.5, color='purple')

```

```

X_T2 = np.array([threshold_thunder_hail[:, 0], (threshold_thunder_hail[:, 0])])
Y_T2 = np.array([threshold_thunder_hail[:, 1], (threshold_thunder_hail[:, 1])])
Z_T2 = np.array([[0] * X_T2.shape[1], [vals.max()] * X_T2.shape[1]])
ax.plot_surface(X_T2, Y_T2, Z_T2, alpha=0.5, color='purple')

ax.set_xlabel(str_xval)
ax.set_ylabel(str_yval)
ax.set_zticklabels=[])

ax.set_xlim(boundaries[str_xval])
ax.set_ylim(boundaries[str_yval])

plt.show()

points_rain = []
points_thunder = []
points_hail = []

vals = vals.transpose()
colors_h = colors_h.transpose()
colors_th = colors_th.transpose()

for step_x in range(num_elements[str_xval]):
    for step_y in range(num_elements[str_yval]):
        if colors_th[step_x, step_y] ==0:
            points_rain += [[X[step_x], Y[step_y], vals[step_x, step_y]]]
        elif colors_th[step_x, step_y] ==1and colors_h[step_x, step_y] ==0:
            points_thunder += [[X[step_x], Y[step_y], vals[step_x, step_y]]]
        else:
            points_hail += [[X[step_x], Y[step_y], vals[step_x, step_y]]]

points_rain = np.array(points_rain)
points_thunder = np.array(points_thunder)
points_hail = np.array(points_hail)

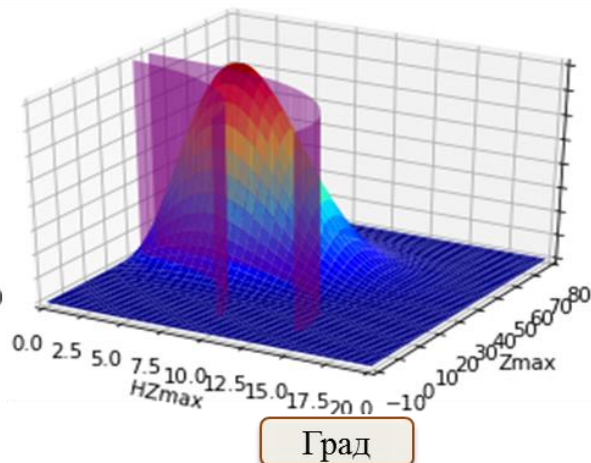
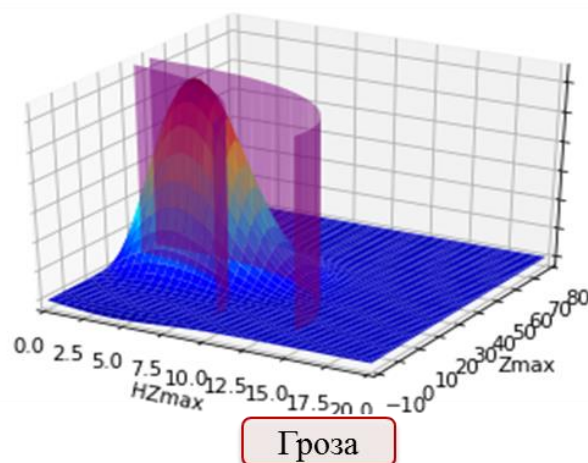
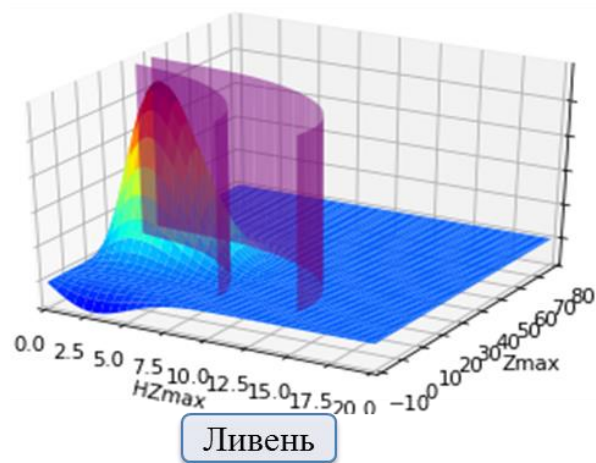
fig, ax = plt.subplots(subplot_kw=dict(projection='3d'))
ax.scatter(points_rain[:, 0], points_rain[:, 1], points_rain[:, 2], color='b')
ax.scatter(points_thunder[:, 0], points_thunder[:, 1], points_thunder[:, 2], color='r')

```

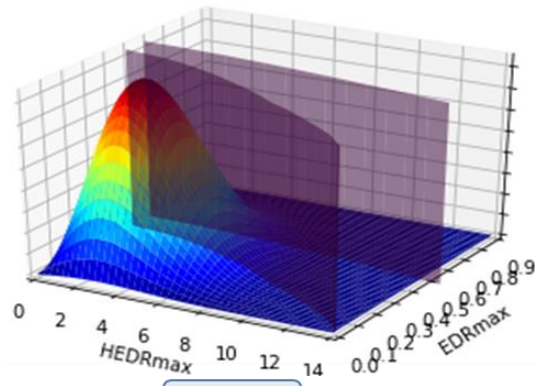
```
ax.scatter(points_hail[:, 0], points_hail[:, 1], points_hail[:, 2], color='y')
ax.legend(['Ливень', 'Гроза', 'Град'])
```

```
ax.set_xlabel(str_xval)
ax.set_ylabel(str_yval)
ax.set(zticklabels=[])
plt.show()
```

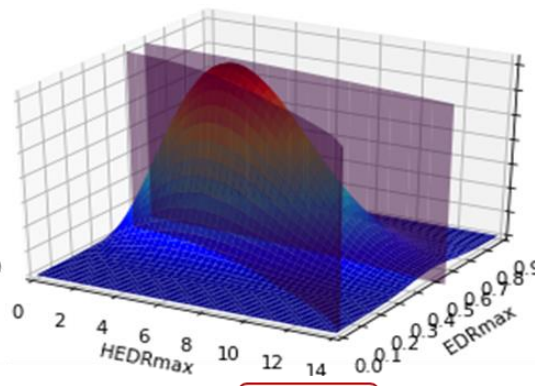
Радиолокационная отражаемость Z_{max}



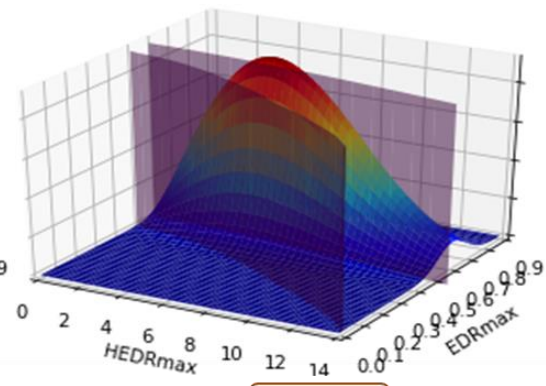
Удельная скорость диссипации турбулентной энергии EDRmax



Ливень

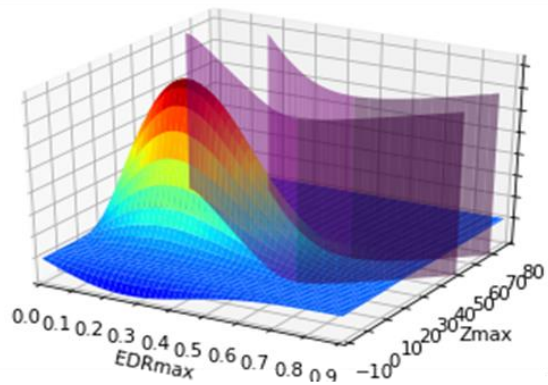


Гроза

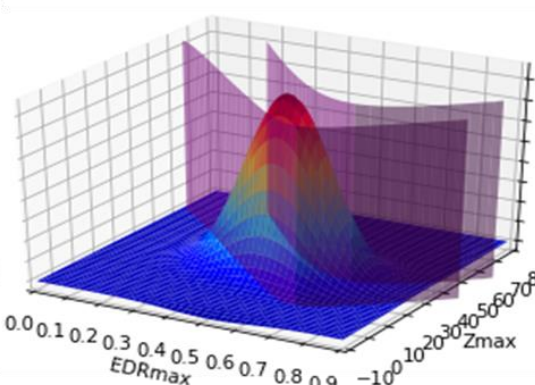


Град

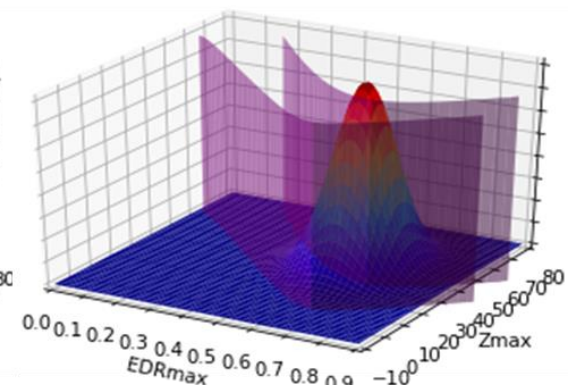
Zmax-EDRmax



Ливень

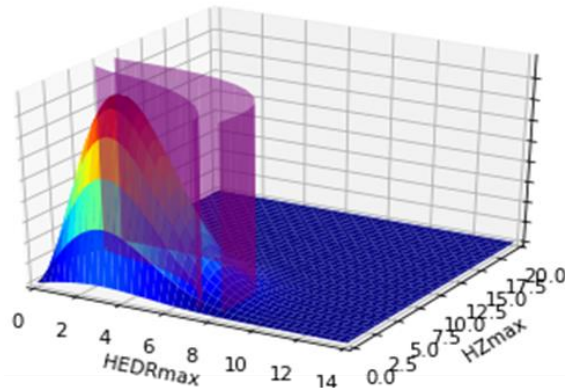


Гроза

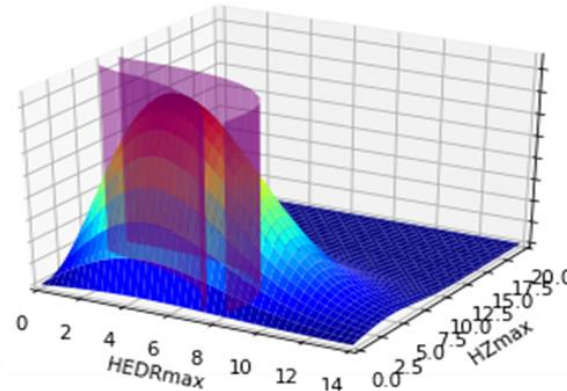


Град

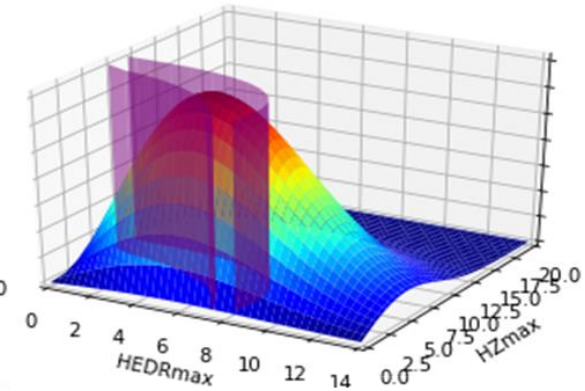
H(Zmax)-(EDRmax)



Ливень



Гроза



Град

2.4 Расчет вероятностей обнаружения

```
from alg import*
```

```
from input_data import*
```

```
# Объявление функции для расчета принадлежности к разным классам
```

```
# Колонки 0 и 1 из эксель файла для различения между ливнем и грозой по значению отражаемости
```

```
func_affiliation_zh_rain_thunder = check_affiliation(get_threshold_values(0, 1))
```

```
# Колонки 2 и 3 из эксель файла для различения между градом и грозой по значению отражаемости
```

```
func_affiliation_zh_thunder_hail = check_affiliation(get_threshold_values(2, 3))
```

```
# Колонки 4 и 5 из эксель файла для различения между ливнем и грозой по значению турбулентности
```

```
func_affiliation_edr_rain_thunder = check_affiliation(get_threshold_values(4, 5))
```

```
# Колонки 6 и 7 из эксель файла для различения между градом и грозой по значению турбулентности
```

```
func_affiliation_edr_thunder_hail = check_affiliation(get_threshold_values(6, 7))
```

```
# Двумерная плотность вероятности по отражаемости для ливня
```

```
func_density_zh_rain = get_distribution_density2D([M['HZmax']['rain'], M['Zmax']['rain']],  
[D['HZmax']['rain'], D['Zmax']['rain']])
```

```
# Расчет объема меньше кривой порога (ливень) и больше кривой (гроза + град) по порогу из колонок 0 и 1
```

```

v_rr, v_rt = calculate_volume_parts(func_density_zh_rain, func_affiliation_zh_rain_thunder, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))
# Расчет объемов меньше кривой порога (ливень + гроза) и больше кривой (град) по порогу из колонок 2 и 3
_, v_rh = calculate_volume_parts(func_density_zh_rain, func_affiliation_zh_thunder_hail, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))

# Расчет отношений объемов, соответствующих вероятностям и вывод на экран
cc_rain_rain = v_rr / (v_rr + v_rt) * 100
mc_rain_thunder = (v_rt - v_rh) / (v_rr + v_rt) * 100
mc_rain_hail = v_rh / (v_rr + v_rt) * 100
print(f'Ливень по отражаемости: Prr {"{:.2f}".format(cc_rain_rain)} | Prt {"{:.2f}".format(mc_rain_thunder)} '
      f'| Prh {"{:.2f}".format(mc_rain_hail)}.')

# Повторяемая логичную процедуру еще 5 раз для других комбинаций продуктов и классов ВМЯ
func_density_zh_thunder = get_distribution_density2D([M['HZmax']['thunder'], M['Zmax']['thunder']],
                                                    [D['HZmax']['thunder'], D['Zmax']['thunder']])

v_tr, v_tt = calculate_volume_parts(func_density_zh_thunder, func_affiliation_zh_rain_thunder, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))
_, v_th = calculate_volume_parts(func_density_zh_thunder, func_affiliation_zh_thunder_hail, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))

mc_thunder_rain = v_tr / (v_tr + v_tt) * 100
cc_thunder_thunder = (v_tt - v_th) / (v_tr + v_tt) * 100
mc_thunder_hail = v_th / (v_tr + v_tt) * 100
print(f'Гроза по отражаемости: Ptr {"{:.2f}".format(mc_thunder_rain)} | Ptt {"{:.2f}".format(cc_thunder_thunder)} '
      f'| Pth {"{:.2f}".format(mc_thunder_hail)}.')

func_density_zh_hail = get_distribution_density2D([M['HZmax']['hail'], M['Zmax']['hail']],
                                                  [D['HZmax']['hail'], D['Zmax']['hail']])

v_hr, v_ht = calculate_volume_parts(func_density_zh_hail, func_affiliation_zh_rain_thunder, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))
_, v_hh = calculate_volume_parts(func_density_zh_hail, func_affiliation_zh_thunder_hail, (boundaries['HZmax'],
                                                boundaries['Zmax']), (num_elements['HZmax'], num_elements['Zmax']))

mc_hail_rain = v_hr / (v_ht + v_hr) * 100

```

```

mc_hail_thunder = (v_ht - v_hh) / (v_ht + v_hr) *100
cc_hail_hail = v_hh / (v_hr + v_ht) *100

print(f'Градпоотражаемости: Phr {"{: .2f}".format(mc_hail_rain)} | Pht {"{: .2f}".format(mc_hail_thunder)} '
f'| Phh {"{: .2f}".format(cc_hail_hail)}.'.')

# EDR

func_density_edr_rain = get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['rain'], M['EDRmax']['rain']],
[D['HEDRmax']['rain'], D['EDRmax']['rain']])

# Расчетобъемовменьшекривойпорога (ливень) ибольшекривой (гроза + град) попорогуизколонок 0 и 1
v_rr, v_rt = calculate_volume_parts(func_density_edr_rain, func_affiliation_edr_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))
# Расчетобъемовменьшекривойпорога (ливень + гроза) ибольшекривой (град) попорогуизколонок 2 и 3
_, v_rh = calculate_volume_parts(func_density_edr_rain, func_affiliation_edr_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))

# Расчетотношенийобъемов, соответствующихвероятностямивыводнаэкран
cc_rain_rain = v_rr / (v_rr + v_rt) *100
mc_rain_thunder = (v_rt - v_rh) / (v_rr + v_rt) *100
mc_rain_hail = v_rh / (v_rr + v_rt) *100
print(f'Ливеньпотурбулентности: Prr {"{: .2f}".format(cc_rain_rain)} | Prt {"{: .2f}".format(mc_rain_thunder)} '
f'| Prh {"{: .2f}".format(mc_rain_hail)}.'.')

func_density_edr_thunder = get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['thunder'], M['EDRmax']['thunder']],
[D['HEDRmax']['thunder'], D['EDRmax']['thunder']])
v_tr, v_tt = calculate_volume_parts(func_density_edr_thunder, func_affiliation_edr_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))
_, v_th = calculate_volume_parts(func_density_edr_thunder, func_affiliation_edr_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))

mc_thunder_rain = v_tr / (v_tr + v_tt) *100
cc_thunder_thunder = (v_tt - v_th) / (v_tr + v_tt) *100
mc_thunder_hail = v_th / (v_tr + v_tt) *100
print(f'Грозাপотурбулентности: Prr {"{: .2f}".format(mc_thunder_rain)} | Prt
{"{: .2f}".format(cc_thunder_thunder)} '

```

```
f'| Prh {:.2f}".format(mc_thunder_hail)).')

func_density_edr_hail = get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['hail'], M['EDRmax']['hail']],
[D['HEDRmax']['hail'], D['EDRmax']['hail']])
v_hr, v_ht = calculate_volume_parts(func_density_edr_hail, func_affiliation_edr_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))
_, v_hh = calculate_volume_parts(func_density_edr_hail, func_affiliation_edr_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['EDRmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['EDRmax']))

mc_hail_rain = v_hr / (v_ht + v_hr) *100
mc_hail_thunder = (v_ht - v_hh) / (v_ht + v_hr) *100
cc_hail_hail = v_hh / (v_hr + v_ht) *100
print(f'Градпотурбулентности: Prr {:.2f}".format(mc_hail_rain)} | Prt {:.2f}".format(mc_hail_thunder)} '
f'| Prh {:.2f}".format(cc_hail_hail)).')
```

```
Ливень по отражаемости: Prr 75.25 | Prt 24.3 | Prh 0.40.
Гроза по отражаемости: Ptr 31.97 | Ptt 50.46 | Pth 17.57.
Град по отражаемости: Phr 4.00 | Pht 21.58 | Phh 74.42.
Ливень по турбулентности: Prr 76.06 | Prt 17.51 | Prh 6.4.
Гроза по турбулентности: Prr 14.63 | Prt 46.27 | Prh 39.10.
Град по турбулентности: Prr 0.3 | Prt 18.07 | Prh 81640.
```

2.5 Расчет вероятностей обнаружения для двумерных плотностей вероятности Zmax-EDRmax

```
fromalgimport*
frominput_dataimport*

# Объявление функция для расчета принадлежностям разным классам
func_affiliation_rain_thunder=check_affiliation(get_threshold_values(0, 1, "thresholdsEDR-Z.xls"))
func_affiliation_thunder_hail=check_affiliation(get_threshold_values(2, 3, "thresholdsEDR-Z.xls"))

# Двумерная плотность вероятности по отражаемости для ливня
func_density_rain=get_distribution_density2D([M['EDRmax']['rain'], M['Zmax']['rain']],
[D['EDRmax']['rain'], D['Zmax']['rain']])
```

```

# Расчет объемов меньше кривой порога (ливень) и больше кривой (гроза + град) по порогу из колонок 0 и 1
v_rr, v_rt=calculate_volume_parts(func_density_rain, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))

# Расчет объемов меньше кривой порога (ливень + гроза) и больше кривой (град) по порогу из колонок 2 и 3
_, v_rh=calculate_volume_parts(func_density_rain, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))

# Расчет отношений объемов, соответствующих вероятностям и вывод на экран
cc_rain_rain=v_rr/ (v_rr+v_rt) *100
mc_rain_thunder= (v_rt-v_rh) / (v_rr+v_rt) *100
mc_rain_hail=v_rh/ (v_rr+v_rt) *100
print(f'Ливень: Prr{"{: .2f}".format(cc_rain_rain)} | Prt{"{: .2f}".format(mc_rain_thunder)} '
f'| Prh{"{: .2f}".format(mc_rain_hail)}.' )

func_density_thunder = get_distribution_density2D([M['EDRmax']['thunder'], M['Zmax']['thunder']],
[D['EDRmax']['thunder'], D['Zmax']['thunder']])

v_tr, v_tt = calculate_volume_parts(func_density_thunder, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))
_, v_th = calculate_volume_parts(func_density_thunder, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))

mc_thunder_rain = v_tr / (v_tr + v_tt) *100
cc_thunder_thunder = (v_tt - v_th) / (v_tr + v_tt) *100
mc_thunder_hail = v_th / (v_tr + v_tt) *100
print(f'Гроза: Ptr {"{: .2f}".format(mc_thunder_rain)} | Ptt {"{: .2f}".format(cc_thunder_thunder)} '
f'| Pth {"{: .2f}".format(mc_thunder_hail)}.' )

func_density_hail = get_distribution_density2D([M['EDRmax']['hail'], M['Zmax']['hail']],
[D['EDRmax']['hail'], D['Zmax']['hail']])

v_hr, v_ht = calculate_volume_parts(func_density_hail, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))
_, v_hh = calculate_volume_parts(func_density_hail, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['EDRmax'],
boundaries['Zmax']), (num_elements['EDRmax'], num_elements['Zmax']))

mc_hail_rain = v_hr / (v_ht + v_hr) *100

```

```
mc_hail_thunder = (v_ht - v_hh) / (v_ht + v_hr) *100
cc_hail_hail = v_hh / (v_hr + v_ht) *100
```

```
print(f'Град: Phr {"{: .2f}".format(mc_hail_rain)} | Pht {"{: .2f}".format(mc_hail_thunder)} '
f'| Phh {"{: .2f}".format(cc_hail_hail)}.'
```

```
Ливень: Prr 76.88 | Prt .16.1 | Prh 0.70.
Гроза: Ptr 14.14 | Ptt 68.32 | Pth 17.55.
Град: Phr 3.12 | Pht 15.88 | Phh 81.00.
```

2.6 Расчет вероятностей обнаружения для двумерных плотностей вероятности H(Zmax)-H(EDRmax)

```
fromalgimport*
```

```
frominput_dataimport*
```

```
# Объявление функция для расчета принадлежностям разным классам
```

```
func_affiliation_rain_thunder=check_affiliation(get_threshold_values(0, 1, "thresholdsH(Z)-H(EDR).xls"))
```

```
func_affiliation_thunder_hail=check_affiliation(get_threshold_values(2, 3, "thresholdsH(Z)-H(EDR).xls"))
```

```
# Двумерная плотность вероятности по отражаемости для ливня
```

```
func_density_rain=get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['rain'], M['HZmax']['rain']],
[D['HEDRmax']['rain'], D['HZmax']['rain']])
```

```
# Расчет объемов меньше кривой порога (ливень) и больше кривой (гроза + град) по порогу из колонок 0 и 1
```

```
v_rr, v_rt=calculate_volume_parts(func_density_rain, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))
```

```
# Расчет объемов меньше кривой порога (ливень + гроза) и больше кривой (град) по порогу из колонок 2 и 3
```

```
_, v_rh=calculate_volume_parts(func_density_rain, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))
```

```
# Расчет отношений объемов, соответствующих вероятностям и вывод на экран
```

```
cc_rain_rain=v_rr/ (v_rr+v_rt) *100
```

```
mc_rain_thunder= (v_rt-v_rh) / (v_rr+v_rt) *100
```

```
mc_rain_hail=v_rh/ (v_rr+v_rt) *100
```

```

print(f'Ливень: Prr{"{: .2f}".format(cc_rain_rain)} | Prt{"{: .2f}".format(mc_rain_thunder)} '
f'| Prh{"{: .2f}".format(mc_rain_hail)}.')

func_density_thunder = get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['thunder'], M['HZmax']['thunder']],
[D['HEDRmax']['thunder'], D['HZmax']['thunder']])

v_tr, v_tt = calculate_volume_parts(func_density_thunder, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))
_, v_th = calculate_volume_parts(func_density_thunder, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))

mc_thunder_rain = v_tr / (v_tr + v_tt) *100
cc_thunder_thunder = (v_tt - v_th) / (v_tr + v_tt) *100
mc_thunder_hail = v_th / (v_tr + v_tt) *100
print(f'Гроза: Ptr {"{: .2f}".format(mc_thunder_rain)} | Ptt {"{: .2f}".format(cc_thunder_thunder)} '
f'| Pth {"{: .2f}".format(mc_thunder_hail)}.')

func_density_hail = get_distribution_density2D([M['HEDRmax']['hail'], M['HZmax']['hail']],
[D['HEDRmax']['hail'], D['HZmax']['hail']])

v_hr, v_ht = calculate_volume_parts(func_density_hail, func_affiliation_rain_thunder, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))
_, v_hh = calculate_volume_parts(func_density_hail, func_affiliation_thunder_hail, (boundaries['HEDRmax'],
boundaries['HZmax']), (num_elements['HEDRmax'], num_elements['HZmax']))

mc_hail_rain = v_hr / (v_ht + v_hr) *100
mc_hail_thunder = (v_ht - v_hh) / (v_ht + v_hr) *100
cc_hail_hail = v_hh / (v_hr + v_ht) *100

print(f'Град: Phr {"{: .2f}".format(mc_hail_rain)} | Pht {"{: .2f}".format(mc_hail_thunder)} '
f'| Phh {"{: .2f}".format(cc_hail_hail)}.')

```

```

Ливень: Prr 75.18 | Prt 21.77 | Prh 3.05.
Гроза: Ptr 34.66 | Ptt 36.28 | Pth 29.06.
Град: Phr 20.48 | Pht 29.55 | Phh 49.97.

```