



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

ФАКУЛЬТЕТ Авиационных систем и комплексов (ФАСК)

КАФЕДРА ТЭРЭО ВТ

Направление подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы
(код и наименование направления подготовки)

СВЯЗИ

Направленность «Радиолокация и радионавигация»
(наименование направленности)

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема Методы классификации опасных метеоявлений в летний период и
реализующие его алгоритмы в метеорологическом радиолокационном
комплексе ближней аэродромной зоны

Обучающийся:

Бояренко Э.С.
(Ф.И.О.)

(Подпись)

Научный руководитель:

д.т.н., профессор, Васильев О.В.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

Рецензенты:

д.т.н. Коротков С.С.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

д.т.н., доцент, Шестаков И.Н.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

Работа допущена к защите:

Заведующий кафедрой

д.т.н., доцент, Болелов Э.А.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

МОСКВА 2025

Актуальность научно-квалификационной работы (НКР).

Влияние метеорологических условий на безопасность полетов ВС очень велико. Анализ авиационных происшествий по статистическим данным ИКАО за последние 25 лет выявил негативную роль "влияния неблагоприятных внешних условий" на безопасность полетов, доля которого составляет 20%, а в 30% данные причины стали косвенными или сопутствующими. Причем, наиболее опасными явлениями погоды при полете по маршруту являются сильные ливневые осадки, грозовая деятельность, град и турбулентность, связанные с конвективной облачностью.

Таким образом, достоверная дистанционная классификация опасных метеоявлений: ливневых осадков, гроз и град, сопровождающих кучево-дождевые облака, являются одной из приоритетных задач, решаемых наземными метеорологическими РЛС.

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 МРЛК БЗ «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, в летний период.
3. Учет ветровых характеристик отраженных сигналов при распознавания 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 науке недостаточно разработаны вопросы, связанные с внедрением методов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» в летний период с учетом ветровых характеристик отраженных сигналов.

В результате сложившейся ситуации можно выделить следующие основные проблемы:

- отсутствует обеспечение безопасности полетов при полете ВС в конвективной облачности;
- отсутствуют методики учета ветровых характеристик атмосферы при классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град»;
- отсутствуют средства внедрения в аппаратуру методик автоматизированной классификации опасных метеоявлений повышенной достоверности.

В НКР для разрешения указанных противоречий решается **актуальная научно-техническая задача** разработки метода и алгоритмов оценивания опасных метеоявлений с учетом ветровых характеристик в наземных МРЛК БЗ.

Объектом исследования являются критерии классификации ОМЯ КДО в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней зоны.

Предмет исследования – разработка методов и алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» в летний период в МРЛК БЗ.

Целью работы является разработка методов и алгоритмов классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» повышенной достоверности в летний период в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны (МРЛК БЗ) с учетом ветровых характеристик отраженных сигналов.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Исследование современных требований к достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений;

2. Анализ информативности ветровых характеристик в интересах классификации метеоявлений «ливень-гроза-град»;

3. Разработка метода классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» в летний период и алгоритмов, его реализующих в МРЛК БЗ, с учетом отражательных и турбулентных характеристик атмосферы;

4. Разработка рекомендаций по практической реализации алгоритмов классификации опасных метеоявлений с учетом ветровых характеристик атмосферы.

Методы исследования. Поставленные задачи решаются с использованием методов теории вероятностей и математической статистики, методов статистических решений, методов теории метеорологической радиолокации.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Исследованы современные требования, предъявляемые к достоверности классификации опасных для авиации метеоявлений

2. Проведен анализ информативности ветровых характеристик в интересах классификации метеоявлений «ливень-гроза-град»;

3. Разработаны методы и алгоритмы классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» повышенной достоверности в МРЛК БЗ в летний период с учетом ветровых характеристик отраженных сигналов.

4. Разработаны рекомендации по практической реализации алгоритмов классификации опасных метеоявлений с учетом ветровых характеристик атмосферы.

Практическая значимость НКР состоит в следующем:

1. Откорректированный критерий позволит существенно повысить оправдываемость классификации опасных метеоявлений, связанных с конвективной облачностью, в летний период.

2. Внедрение результатов НКР в разработку существующих и перспективных метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны позволит повысить ситуационную осведомленность о метеорологической обстановке с кучево-дождевой облачностью на маршруте

полета и при совершении взлета и посадки для экипажей воздушных судов и диспетчеров управления воздушным движением, и тем самым обеспечить заданный уровень безопасности полетов в районе аэродрома.

3. Разработанные метод и алгоритм классификации с учетом ветровых характеристик отраженных сигналов повысят достоверность распознавания опасных явлений в МетеоРЛС на алфавите «ливень - гроза - град».

Научная значимость работы заключается в разработке метода и алгоритмов оценивания опасных метеорологических явлений, позволяющих проводить исследования мощных кучево-дождевых облаков и сопутствующих опасных явлений погоды (ливневые осадки, гроза, град, шквал, смерч), изучать турбулентность в условиях различных синоптических ситуаций, местных особенностей и циркуляций.

На защиту выносятся теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности использования ветровых характеристик атмосферы при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности «ливень-гроза-град»

Основные положения НКР докладывались и обсуждались на: XXXIII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); XIX, XX, XXI Всероссийской НТК «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского», Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (г. Москва, 2023 г.), VIII практическом семинаре «Безопасность полетов. Безопасность топливообеспечения» (г. Москва, 2025 г.), а также на многих других мероприятиях.

По материалам НКР опубликовано 19 работ.

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения.

В первом разделе работы «Обоснование необходимости повышения достоверности классификации опасных метеоявлений в интересах обеспечения безопасности и регулярности полетов» проведен анализ влияния опасных

метеоявлений, связанных с кучево-дождевой облачностью на безопасность полетов. На сегодняшний день безопасность полетов зависит от метеорологических условий, при которых совершается полет. Анализ авиационных происшествий по статистическим данным ICAO за последние 25 лет выявил негативную роль "влияния неблагоприятных внешних условий" на безопасность полетов, доля которого составляет 20%, а в 30% данные причины стали косвенными или сопутствующими. В связи с этим существует острая необходимость в повышении ситуационной осведомленности об метеорологической обстановке при совершении полетов воздушными судами.

Также непосредственно был проведен анализ опасных гидродинамических факторов, таких как скорость движения ветра, радиолокационная отражаемость, водность, турбулентность и т.д., сопровождающих кучево-дождевую облачность. Данный анализ показал существенные различия по гидродинамическим параметрам ливней, гроз и града. 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.

На сегодняшний день для классификации метеорологических явлений ливень-гроза-град на территории Российской Федерации используются различные радиолокационные станции типа ДМРЛ-С С-диапазона и МРЛК БЗ "Монокль" X-диапазона. Критерии классификации метеоявлений, используемые в ДМРЛ-С и МРЛК БЗ, 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, естественно основанные на многолетних наблюдениях и в этом смысле вызывающие

уважение, разработаны для каждого явления отдельно и носят некоторый эвристический характер.

Анализ этих критериев показал, 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, связанных с кучево-дождевой облачностью связаны с:

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

Сформулирована постановка задачи исследования.

Во втором разделе работы «Обоснование исходных данных байесовского метода классификации опасных метеоявлений» разработана методика проведения экспериментального исследования для формирования базы статистических данных (Рисунок 1).

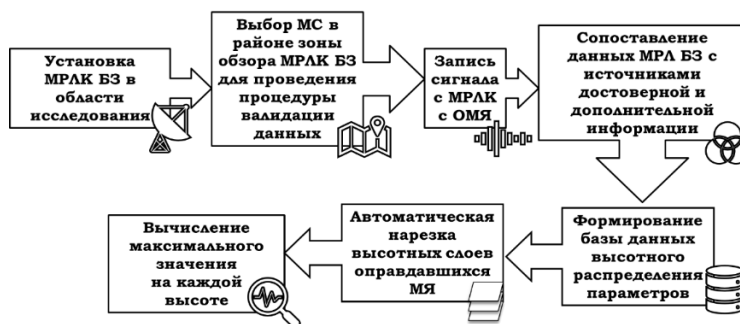


Рисунок 1 – Методика формирования базы данных экспериментального исследования параметров МЯ.

Валидация полученных данных о классифицированных метеорологических явлениях в МРЛК БЗ 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). При наблюдении явления по карте МРЛК БЗ и карте ДМРЛ-С за указанный интервал времени, явление считается подтверждённым по карте МРЛК БЗ в том случае, если совпадает в пространстве с явлением на карте ДМРЛ-С, в противном случае – неподтверждённым. Всего было проведено по 50 подтвержденных опытов для каждого ОМЯ.

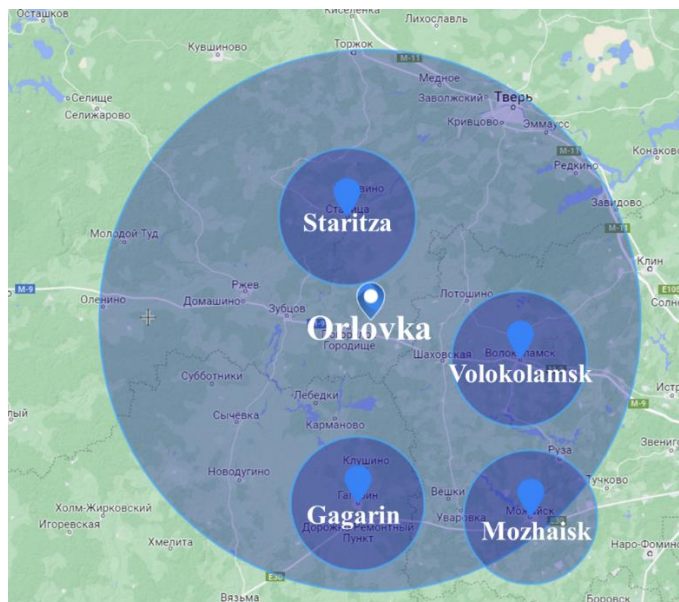


Рисунок 2 – Схема валидации экспериментальных данных

Разработан метод статистического анализа экспериментальных данных ОМЯ «ливень-гроза-град» (Рисунок 3).

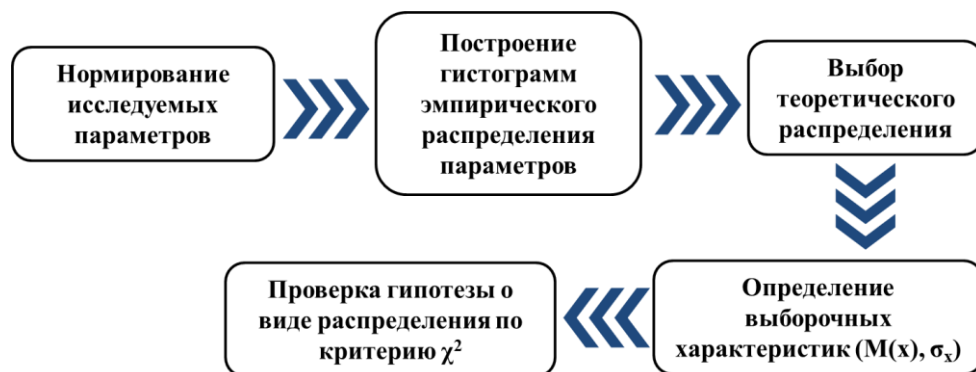


Рисунок 3 – Структура методики статистического анализа экспериментальных данных

На основании приведенных методик был проведен статистический анализ параметра $H(EDR_{max})$ для ливня, а также амплитудного распределения параметров отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии (Z_{max} , EDR_{max}) для гроз и града. 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 Рэлея – Райса

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x \cdot \mu}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

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

Распределения Райса для параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , рассматриваемых метеоявлений отображены на рисунках 4 и 5.

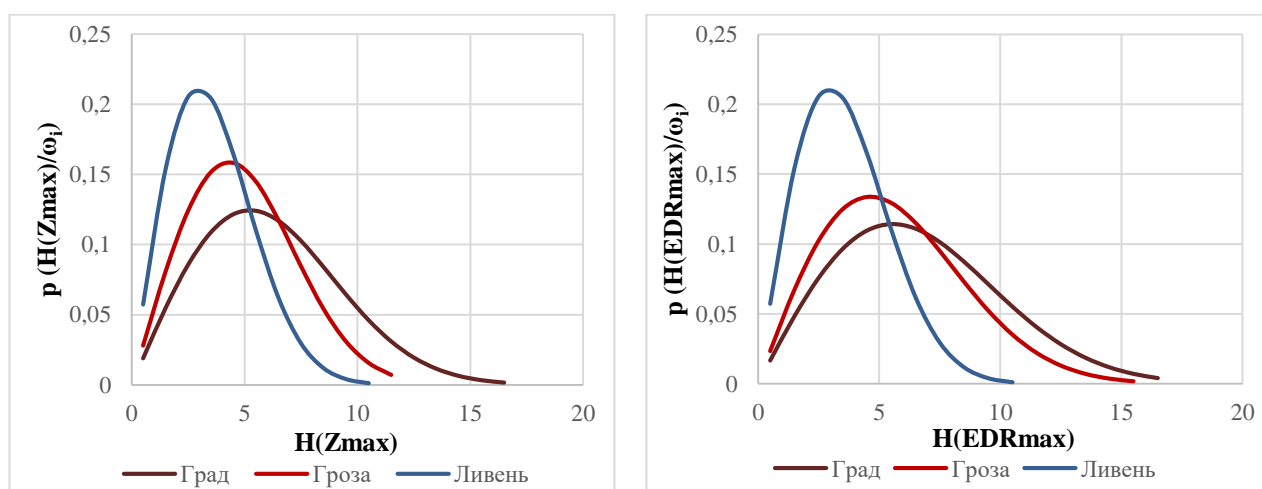


Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности Z_{max} и EDR_{max} по высоте для рассматриваемых метеоявлений

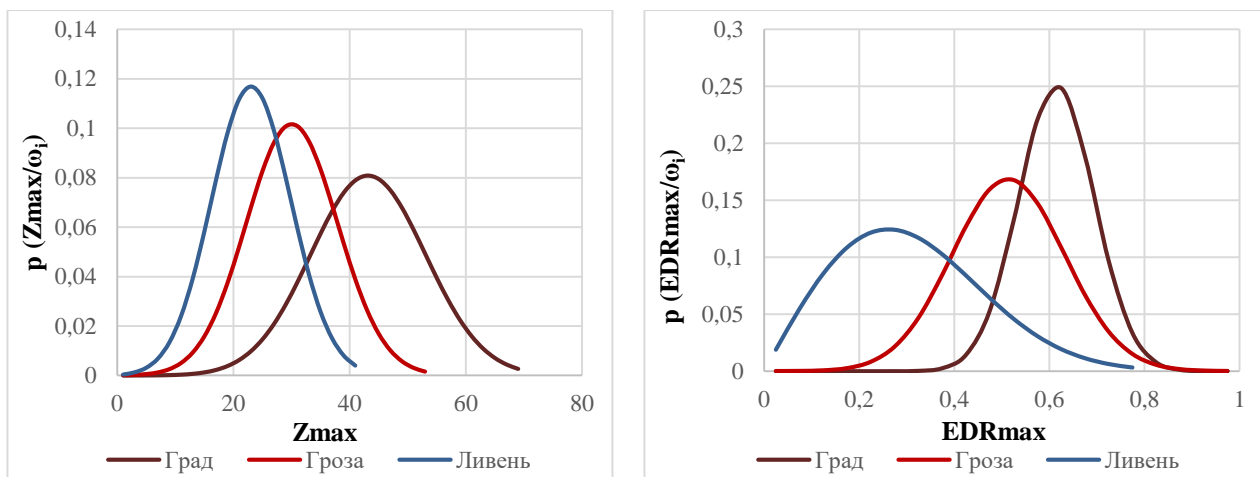


Рисунок 5 – Плотность распределения вероятности Z_{\max} и EDR_{\max} по значениям для рассматриваемых метеоявлений

Полученные, по результатам вычислений высотного распределения параметров отражаемости и EDR для ливня, гроз и града параметры μ , σ_x распределения Райса указаны в таблице 1. По сути, данная таблица представляет собой параметрическое описание признаков классификации метеорологических явлений «ливень-гроза-град».

Таблица 1 – 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	$\sigma_x = 0.2$	$\sigma_x = 0.12$	$\sigma_x = 0.08$

Статистический анализ данных натурного эксперимента показал невысокую различительную способность каждого отдельного параметра при

решении задачи классификации метеоявлений в пределах заданного алфавита. Очевидный выход из создавшейся ситуации диктует теория распознавания. Для повышения достоверности классификации необходимо совместное использование информационных параметров, например, в виде многомерных плотностей распределения вероятностей случайных параметров.

Структура классификации опасных метеорологических явлений (ОМЯ), связанных с кучево-дождевой облачностью (КДО) на основании радиолокационных наблюдений, должна быть представлена в виде решение 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.

Для достоверного распознавания ОМЯ КДО требуется определение наиболее информативных признаков, описывающих образы рассматриваемых явлений. Выявление оптимальных признаков распознавания - одна из основных и важных задач в теории распознавания образов, которая заключается в нахождении минимального количества признаков, наиболее информативно описывающих образы в данной системе (или задаче) распознавания. Одним из подходов к выбору информативных признаков распознавания является анализ вероятности распределения этих признаков.

Третий раздел работы «Байесовский метод классификации опасных метеоявлений при совместном использовании отражательных и турбулентных характеристик атмосферы» посвящен разработке алгоритма классификации опасных метеоявлений КДО с использованием рабочего словаря признаков.

Метод классификации опасных метеорологических явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью на основании радиолокационных наблюдений, представляется в виде решения следующих взаимосвязанных задач:

- формирование рабочего 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 $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$;
- обоснование и выбор единого критерия классификации, на основании которого будут формироваться пороги принятия решений;
- расчет порогов принятия решений для различных комбинаций признаков;
- формирование рабочего словаря признаков на основании анализа информативности признаков классификации;
- разработка алгоритма классификации в соответствии с выбранным критерием, исходя из требуемой достоверности классификации.

При строгой постановке задачи классификации формирование полной группы событий предполагает наличие в алфавите класса «другое событие». В рассматриваемой постановке это метеоявление «сильный дождь» снизу по опасности и, по сути, не являющееся опасным, а также «смерч» выше рассматриваемых явлений по опасности, но пренебрежительно редко встречающееся в умеренных широтах Европейской территории России.

Особый интерес представляет собой операция расчета порогов принятия решений 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 $i, k; i \neq k, i \in \{\text{л, гз, гд}\}$ осуществляется в соответствии со значением порога, определяемого решением уравнения

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

В результате, для любого признака из априорного словаря может быть сформирована полная матрица вероятностей классификации

$$P(x) = \begin{bmatrix} P_{\text{лл}}(x) & P_{\text{лгз}}(x) & P_{\text{лгд}}(x) \\ P_{\text{гзл}}(x) & P_{\text{гзгз}}(x) & P_{\text{гзгд}}(x) \\ P_{\text{гдл}}(x) & P_{\text{гдгз}}(x) & P_{\text{гдгд}}(x) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

элементы которой вычисляются как

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{л,л}}(x) = \int_0^{h_{\text{л,гз}}(x)} p(x, \text{л}) dx; \\ P_{\text{л,гз}}(x) = \int_{h_{\text{л,гз}}(x)}^{h_{\text{гз,гд}}(x)} p(x, \text{л}) dx; \\ P_{\text{л,гд}}(x) = \int_{h_{\text{гз,гд}}(x)}^{\infty} p(x, \text{л}) dx; \\ P_{\text{гз,л}}(x) = \int_0^{h_{\text{л,гз}}(x)} p(x, \text{гз}) dx; \\ P_{\text{гз,гз}}(x) = \int_{h_{\text{л,гз}}(x)}^{h_{\text{гз,гд}}(x)} p(x, \text{гз}) dx; \\ P_{\text{гз,гд}}(x) = \int_{h_{\text{гз,гд}}(x)}^{\infty} p(x, \text{гз}) dx; \\ P_{\text{гд,л}}(x) = \int_0^{h_{\text{л,гз}}(x)} p(x, \text{гд}) dx; \\ P_{\text{гд,гз}}(x) = \int_{h_{\text{л,гз}}(x)}^{h_{\text{гз,гд}}(x)} p(x, \text{гд}) dx; \\ P_{\text{гд,гд}}(x) = \int_{h_{\text{гз,гд}}(x)}^{\infty} p(x, \text{гд}) dx. \end{array} \right. , \quad (4)$$

где диагональные элементы определяют достоверность принятия правильных решений. Применение в качестве пределов интегрирования 0 и ∞ не совсем корректно, однако постановка задачи с ограниченным рабочим алфавитом классов это вполне допускает.

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

$$p(x_1, \mu_1, \sigma_1, x_2, \mu_2, \sigma_2, \dots, x_n, \mu_n, \sigma_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i) \quad (5)$$

где $p(x_i, \mu_i, \sigma_i)$ определена в виде (14). А расчет порогов принятия решений производится решением уравнений вида

$$\prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i) - \prod_{i=1}^n p(x_k, \mu_k, \sigma_k) = 0 \quad (6)$$

Для достоверного распознавания ОМЯ КДО требуется определение наиболее информативных признаков, описывающих образы рассматриваемых явлений.

Полученные в результате анализа информативности данные, показали, что образом, наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$. Большей разделяющей способностью обладают признаки Z_{\max} , EDR_{\max} , однако и для них достоверность классификации гроз неприемлема.

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} , $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$.

На рисунках 6 и 7 изображены двумерные плотности распределения $p(Z_{\max}, H(Z_{\max})/\omega_i)$ и $p(EDR_{\max}, H(EDR_{\max})/\omega_i)$ соответственно.

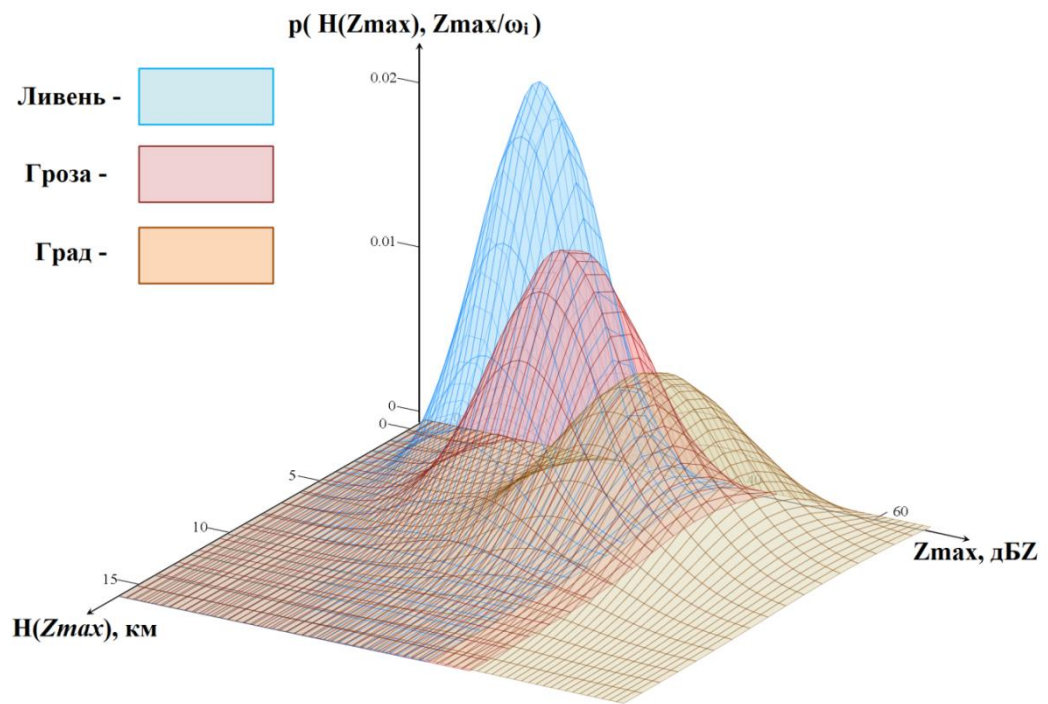


Рисунок 6 – Поверхность двумерной плотности вероятности радиолокационной отражаемости

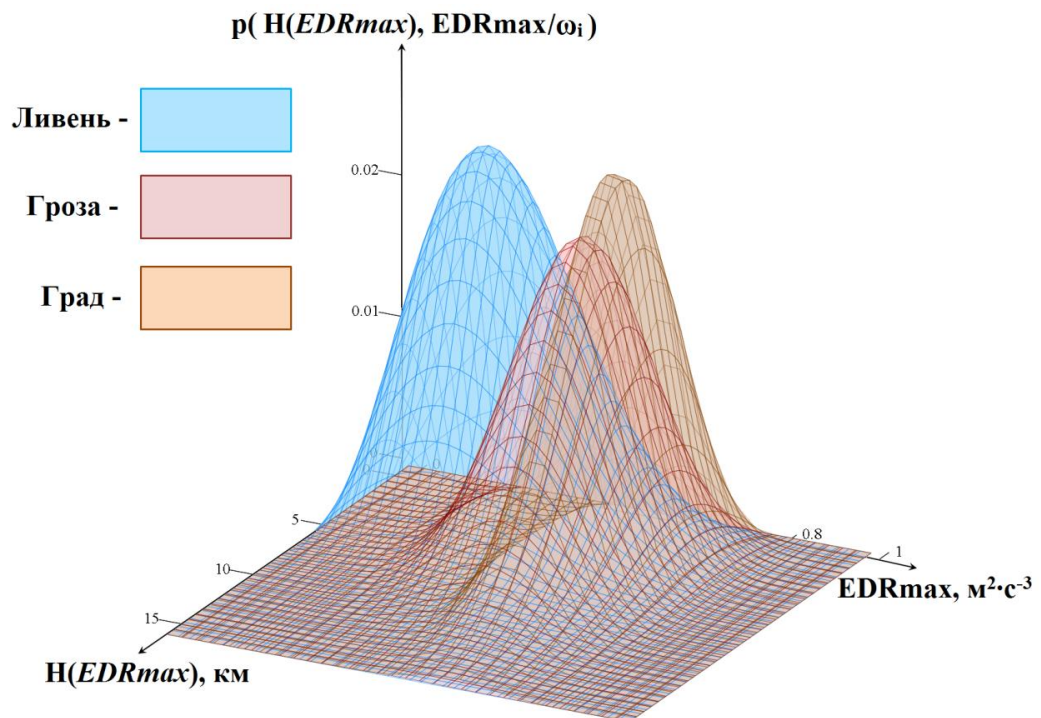


Рисунок 7 – Поверхность двумерной плотности вероятности EDR
Соответствующие матрицы вероятностей имеют вид

$$P(Zmax, H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,753} & 0,243 & 0,004 \\ 0,320 & \mathbf{0,505} & 0,175 \\ 0,040 & 0,216 & \mathbf{0,744} \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$P(EDRmax, H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,761} & 0,175 & 0,064 \\ 0,146 & \mathbf{0,463} & 0,391 \\ 0,003 & 0,181 & \mathbf{0,816} \end{vmatrix} \quad (8)$$

Для наиболее информативных признаков Zmax и EDRmax матрица равна

$$P(Zmax, EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,769} & 0,161 & 0,070 \\ 0,141 & \mathbf{0,683} & 0,176 \\ 0,031 & 0,159 & \mathbf{0,810} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Матрица (9) ожидаемо имеет лучшие показатели по достоверности классификации. Проанализируем рост этого показателя с увеличением размерности решаемой задачи. Получим

$$P(Zmax, H(Zmax), H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,809} & 0,174 & 0,017 \\ 0,231 & \mathbf{0,553} & 0,216 \\ 0,075 & 0,173 & \mathbf{0,752} \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$P(EDRmax, H(EDRmax), H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,788} & 0,146 & 0,066 \\ 0,251 & \mathbf{0,497} & 0,252 \\ 0,049 & 0,144 & \mathbf{0,807} \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,800} & 0,195 & 0,005 \\ 0,162 & \mathbf{0,691} & 0,147 \\ 0,024 & 0,159 & \mathbf{0,817} \end{vmatrix} \quad (12)$$

И наконец,

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax, H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,839} & 0,138 & 0,023 \\ 0,145 & \mathbf{0,701} & 0,154 \\ 0,022 & 0,157 & \mathbf{0,821} \end{vmatrix} \quad (13)$$

В матрице вероятностей (13), 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.

В случае с ливнем вероятностей правильной классификации 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 Z_{\max} и EDR_{\max} . 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».

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

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 четвертом разделе «Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности классификации опасных метеоявлений в МРЛК БЗ» изложены предложения по корректировке алгоритмического обеспечения МРЛК БЗ 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} , $H(EDR_{\max})$.

Проведенный анализ эффективности классификации ОМЯ КДО по ранее накопленным данным на модели программного обеспечения МРЛК БЗ по принятым критериям показал, что данные критерии далеки от оптимальности с точки зрения вероятностей правильной классификации. В свою очередь классификация по предлагаемым критериям при объединении признаков показала наилучшую эффективность (. Причём явления ливня, грозы и града имели бóльшую оправдываемость при сопоставлении данных МРЛК БЗ с наземными метеостанциями.

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

На основании вышесказанного были разработаны предложения по корректировке алгоритмического обеспечения МРЛК БЗ при классификации ОМЯ КДО.

Последовательность операций заключается в виде первичной обработки сигналов, а также вторичной обработки информации.

Первичная обработка сигналов (Рисунок 8) предполагает:

- накопление отраженного сигнала, формирование пачек, получение спектра сигнала в каждом канале дальности для каждого углового положения антенны (в так называемых «конических сечениях»);
- фильтрация импульсных помех, формирование порога, оценка значений мощности и обнаружение сигнала в каждом канале дальности.
- оценка значений радиальной скорости и ширины спектра метеообъектов для всех каналов дальности, в которых обнаружен сигнал;

- расчет турбулентности в результате обработки скоростных параметров в «сигнальных» ячейках;
- формирование выходных векторов отражаемости, радиальных скоростей и турбулентности для заданного углового положения антенны.

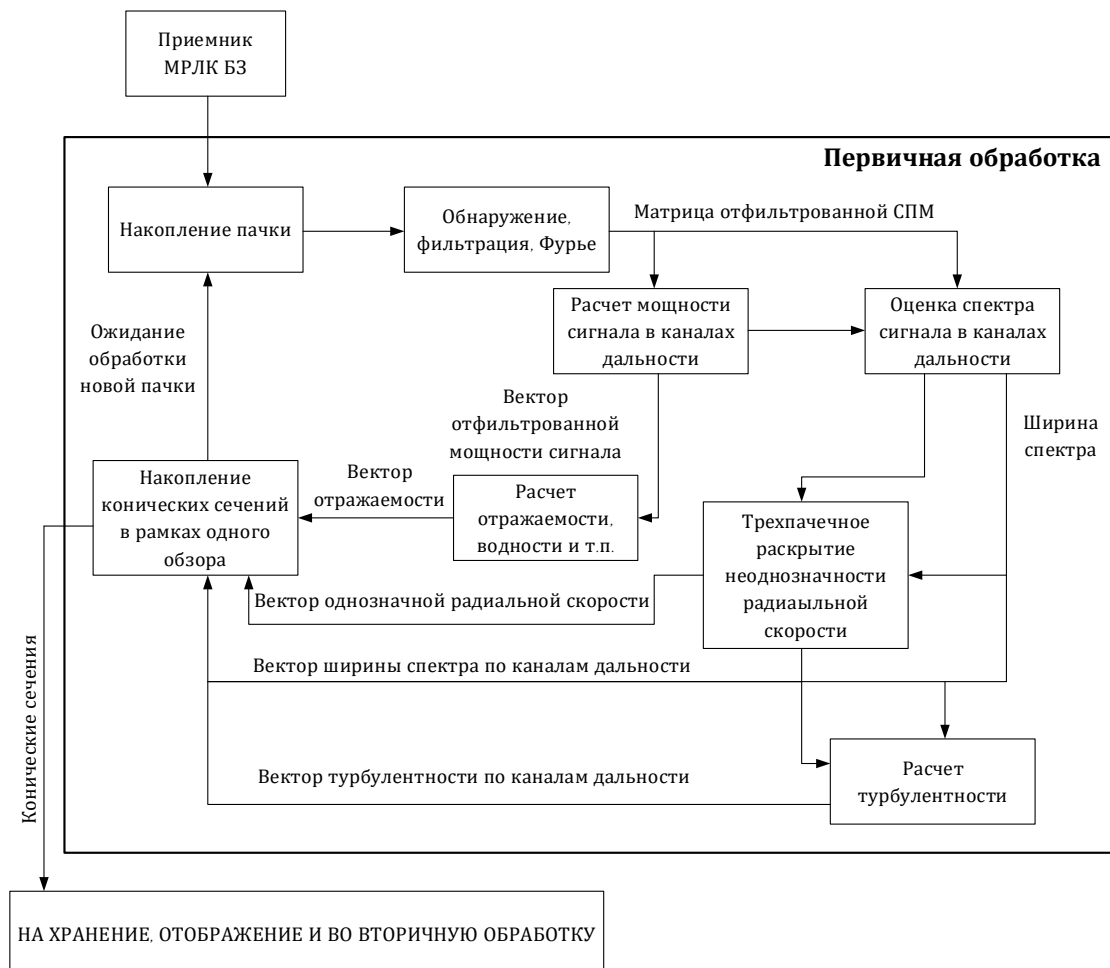


Рисунок 8 – Первичная обработка сигналов

Вторичная обработка информации (Рисунок 9) предполагает:

- формирование декартова пространства в координатах X , Y , Z относительно РЛС с размером ячеек $1 \times 1 \times 1$ км;
- значение метеопараметра для центра ячейки формируется в результате усреднения всех измерений, попавших в ячейку;
- расчет промежуточных значений метеопараметров производится через градиент между соседними точками, как по вертикали; так и по горизонтали;
- формируются карты метеоявлений с оконтуриванием, градацией опасности и их любые сечения.

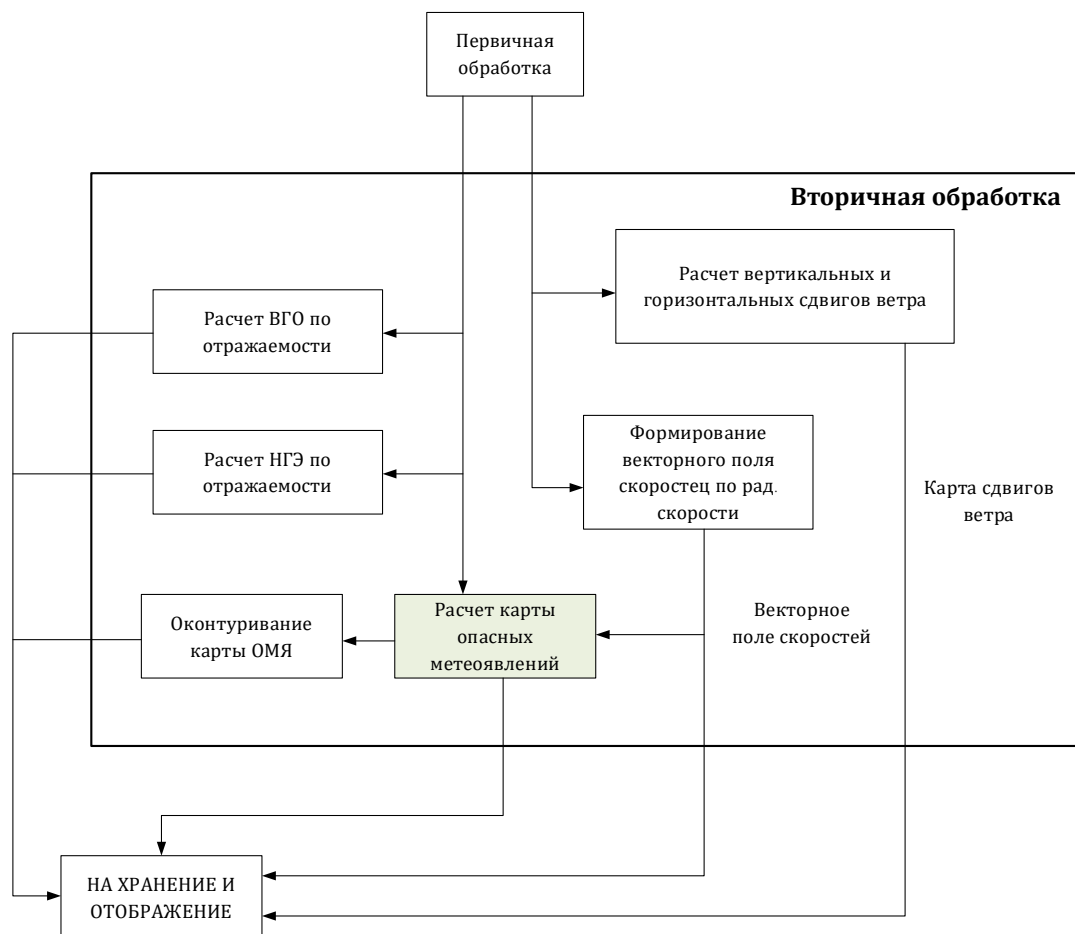


Рисунок 9 – Вторичная обработка информации

Очевидно, что основные доработки должны касаться блока «Расчет карты опасных метеоявлений» (Рисунок 10).

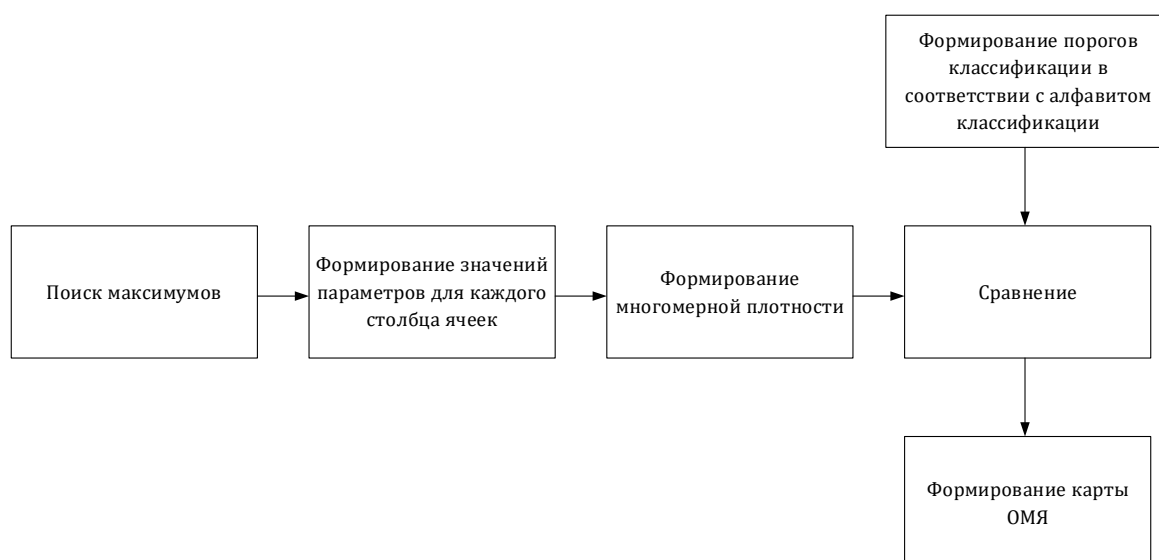


Рисунок 10 – Блок «Расчет карты опасных метеоявлений»

Вначале производится анализ значений признаков классификации в каждой ячейке декартова пространства в блоке «Поиск максимумов». 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. Предложенные незначительные доработки алгоритмического обеспечения позволят существенно повысить эффективность классификации ОМЯ КДО.

В рамках инновационного метода классификации ОМЯ КДО, основанного на комплексном использовании отражательных и ветровых характеристик атмосферы была оценена их зависимость от климатической зоны и местных особенностей циркуляции атмосферы по данным МРЛК БЗ, размещённых на аэродроме Орловка (Тверская область), в г. Воронеж (Воронежская область), в пос. Донское (Калининградская область). Проведен статистический анализ экспериментальных данных опасных метеорологических явлений по данным трёх единиц МРЛК БЗ, размещённых в различных условиях местных особенностей циркуляции атмосферы. В работе выявлены тренды изменения параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , в зависимости от климатических условий и географического расположения МРЛК БЗ. В типовых случаях было показано на сколько (в %) сдвигается порог принятия решения для одномерных задач для критерия максимального правдоподобия. Для параметра Z_{max} порог принятия решений ливень/гроза (Нл-гз) 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 (Нгз-гд) для Воронежа сдвинулся левее на 2,8%, а для Калининграда увеличился на 13,47% по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Тенденция изменения пороговых значений для параметра EDR_{max} выглядит следующим образом: процентное изменение порогового значения 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 составляет 53,7%.

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.

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.

В заключении формируются основные выводы по результатам работы.

Основные результаты НКР сводятся к следующему:

1. Проведен анализ метеоугроз, влияющих на безопасность полетов и проанализирован состав и возможности современных средств метеообеспечения полетов.
2. Проведен анализ существующих критериев классификации опасных метеоявлений «ливень-гроза-град» и выявлены несовершенства в применяемых критериях.
3. Разработана методика проведения экспериментального исследования по регистрации отражательных и турбулентных характеристик в рассматриваемых метеоявлениях.
4. Разработан метод и алгоритм оценки отражательных и турбулентных характеристик в рассматриваемых метеоявлениях в МРЛК БЗ.
5. Разработаны рекомендации и основные положения концепции применения алгоритмов классификации опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевыми облаками в МРЛК БЗ в интересах аэронавигационного обеспечения полетов.