

На правах рукописи



Жарашуев Мурат Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОПРЯЖЕНИЯ И
ОБРАБОТКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ И ШТОРМОПОВЕЩЕНИЯ**

Специальность 1.6.18 Науки об атмосфере и климате.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в отделе активных воздействий ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)

Научный консультант: **Абшаев Али Магомедович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
директор НПЦ «Антиград», эксперт ВМО по
модификации погоды, член международной
комиссии по облакам и осадкам ассоциации по
метеорологии и атмосферным наукам, г. Нальчик

Официальные оппоненты: **Синькевич Андрей Александрович**,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник ФГБУ «Главной геофизической
обсерватории им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»),
г. Санкт-Петербург

Куповых Геннадий Владимирович, доктор
физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физико-математических
основ инженерного образования института
компьютерных технологий и информационной
безопасности ФГАОУ ВО «Южный
федеральный университет», г. Ростов - на - Дону

Сенов Хамиша Машхариевич,
доктор физико-математических наук, заведующий
кафедрой мехатроники и робототехники ФГБОУ
ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный
университет» (ФГАОУ ВО «СКФУ»), г. Ставрополь

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный
университет» (ФГАОУ ВО «СКФУ»), г. Ставрополь

Защита состоится **04 июня** 2024 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета ДС 24.2.365.02 на базе ФГБОУ ВО «Российский
государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196,
Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский
государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета:
<https://www.rshu.ru/university/dissertations/archive.php>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук,



Т.С. Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время во всем мире большое внимание уделяется развитию методов и средств метеорологических наблюдений, созданию разветвленных систем геофизического мониторинга, оценке состояния и прогноза погоды, основанной на применении радиолокационных, грозопеленгационных, наземных и спутниковых наблюдений. Особую значимость при этом имеют радиолокационные метеорологические наблюдения, которые обеспечивают оперативный обзор пространства, обнаружение полей облачности, распознавание опасных явлений погоды, измерение осадков, и поэтому широко применяются в практике краткосрочных прогнозов погоды в системе штормооповещения аэропортов и населенных пунктов, для исследования облаков и осадков, в системе оповещения о паводках ливневого происхождения. Прогресс в этой области способствует прогрессу и в области изучения распространения радиоволн, радиосвязи, передачи и обработки информации.

Высокая информативность метеорологических радиолокаторов (МРЛ) для мониторинга погоды, обнаружения и оповещения об опасных явлениях погоды привела к созданию государственных радиолокационных метеорологических сетей во многих странах. Радиолокационная сеть России, включавшая ранее около 40 позиций, оснащенных радиолокаторами МРЛ-5, в настоящее время переоснащается на автоматизированные доплеровские радиолокаторы ДМРЛ-С и, согласно федеральной целевой программе, будет доведена до 140 радарных центров. Для эффективного повышения достоверности радиолокационных метеорологических данных особую важность имеет развитие методов и технических средств калибровки и контроля параметров МРЛ.

Применяемые в мире радарные, грозопеленгационные, спутниковые и наземные системы метеорологических наблюдений каждая в отдельности не соответствуют возрастающим требованиям к информативности и точности оценки метеорологической ситуации, идентификации опасных погодных явлений в условиях бурного развития промышленности, сельского хозяйства, освоения территорий и изменения климата. Проблема объединения различных видов информации – радиолокационной, грозопеленгационной, спутниковых наблюдений с данными наземной сети метеостанций, становится все более острой. Такое комплексирование метеорологической информации существенно повышает качество прогноза и диагноза погоды, но требует применения высокопроизводительной вычислительной техники и современных программных средств. Это усугубляется тем, что первичная обработка радиолокационной информации и её экспресс анализ в оперативной практике должны осуществляться в реальном масштабе времени и непосредственно в составе радиолокационной системы наблюдений.

Применение радиолокационной информации в работах по модификации погоды, включая автоматизированное получение и обработку трехмерной информации, обнаружение и распознавание объектов воздействия с целью предотвращения града или искусственного увеличения осадков, управления операциями по засеву облаков также требует повышения оперативности получения и эффективности обработки метеорологической информации.

Все это обуславливает высокую актуальность исследования грозоградовых процессов с помощью метеонаблюдений, модернизации и оптимизации методов обработки метеорологической информации, повышение точности оценки метеообстановки, автоматизации операций по активному воздействию на атмосферные процессы. Эта сложная и многогранная задача включает в себя разработку методов:

- калибровки каждого МРЛ и радиолокационной сети в целом;
- повышения адекватности и снижения погрешности измерений;
- сопряжения данных радиолокационных, грозопеленгационных и наземных наблюдений и измерений;
- радиолокационного распознавания метеообъектов;
- статистического анализа сопряженной радиолокационной и грозопеленгационной информации и проведение исследований на их основе.

Целью настоящей работы является исследование грозоградовой активности на основе комплексной обработки грозопеленгационных, радиолокационных и наземных данных для совершенствования технологии противоградовой защиты и штормооповещения.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Выполнен системный анализ современного состояния методов и технических средств метеорологических наблюдений.
2. Разработаны методы, алгоритмы и программы автоматической обработки грозопеленгационной, радиолокационной и наземной информации от метеостанций и постов.
3. Выполнены исследования грозоградовой активности конвективных облаков на основе комплексной обработки грозопеленгационных, радиолокационных и наземных данных.
4. Исследовано влияние орографии Северного Кавказа на развитие грозоградовых процессов.
5. Проведен сравнительный анализ градовой активности различных регионов (на примере Ставропольского края и Республики Крым).
6. Выявлены закономерности суточного хода градовой активности, а также соотношения различных типов осадков на исследуемых территориях.
7. Проведен анализ молниевой активности по данным грозопеленгационной сети Северного Кавказа.

8. Проведена интеграция (комплексирование) грозопеленгационной информации, данных радиолокационных сетей, наземных данных метеостанций и постов на Северном Кавказе.

9. Разработан и запатентован осадкомер с увеличенной площадью водосбора, повышающий степень корреляции количества осадков с данными МРЛ.

Научная новизна результатов диссертационной работы, в ходе выполнения которой впервые:

- Разработаны новые автоматизированные методы, алгоритмы и программы для ЭВМ идентификации и локализации КЯ, измерения их координат и комплекса их параметров и определения тенденции развития, направления и скорости перемещения каждой ячейки.

- Выполнены исследования градовой активности конвективных облаков на территориях Северного Кавказа и Крыма с использованием метода автоматической идентификации КЯ.

- Определены погрешности измерения количества осадков МРЛ по данным наземной сети метеостанций и постов.

- Предложен новый метод локализации и распознавания облаков различных типов, наблюдаемых радиолокационными системами.

- Проведено комплексное исследование грозопеленгационной информации, данных радиолокационных сетей, наземных данных метеостанций и постов на Северном Кавказе с учетом характеристик подстилающей поверхности и разработанных в рамках диссертационной работы методов сбора и обработки метеорологической информации.

- Разработаны и внедрены программные комплексы для сравнения радиолокационной и наземной информации и автоматического распознавания типа облаков по данным сети МРЛ.

- Разработан и запатентован осадкомер с увеличенной площадью водосбора, повышающий степень корреляции количества осадков с данными МРЛ.

- Разработан новый метод автоматической калибровки и контроля параметров МРЛ сети штормоповещения по эталонному локатору, позволяющий привести в соответствие показания всех МРЛ этой сети и уменьшить ошибки в системе оповещения.

- Разработан новый метод фильтрации аномального радиоэха.

- Разработан новый метод статистического анализа грозоградовой активности с использованием карты рельефа местности, грозопеленгационной и радиолокационной информации.

- Впервые созданы методика и программа автоматического выделения навеса радиоэха градовых облаков.

- Предложены новая методика и программа сопоставления радиолокационной и наземной информации о суммарном количестве и

интенсивности осадков.

– Впервые разработана методика статистической оценки грозоградовой активности в зависимости от рельефа местности на основе грозопеленгационной и радиолокационной информации. Проведены исследования грозовой активности на территории Северного Кавказа и выявлены наиболее грозо- градоопасные районы.

– Разработаны новые рекомендации по оптимизации оценки эффективности воздействия на облачные процессы на основе применения предложенного метода автоматической идентификации КЯ и получения графиков временного хода параметров каждой КЯ.

Практическая ценность:

1. Полученные в работе статистические данные о характеристиках синхронных измерений молниевых разрядов различных типов и радиолокационных характеристик конвективных облаков могут быть использованы для уточнения электрической и микрофизической структуры конвективных облаков на различных стадиях их развития.

2. Метод оценки грозоградовой активности территории по данным радиолокационной и грозопеленгационной сетей может быть полезен при расширении территорий противогродовой защиты, для нужд МЧС, авиации, а также анализа последствий изменения климата.

3. Сделанный в работе вывод о том, что достоверность грозопеленгационных данных зависит от удаленности сигнала от всех грозопеленгаторов сети, необходимо учитывать при анализе временных рядов грозовой активности. Климату наиболее грозоопасных районов от г. Эльбрус вниз в северо-западном направлении низкогорья Кавказа, несмотря на небольшую высоту рельефа, присущи особенности долин и равнин, что создает благоприятные условия для развития грозоградовых процессов на наветренных склонах. Именно этим обусловлено то, что в среднем больше всего молниевых разрядов типа «облако-облако» встречается на высотах от 500 до 1000 м, а разрядов типа «облако-земля» на высотах от 1 до 2 км, при этом пик молниевой активности, образующийся над любым рельефом помимо высокогорья, приходится на июнь. Для высокогорья же наблюдалось увеличение количества гроз на квадратный километр с мая по сентябрь. Данные исследования использовались для создания зон с повышенной молниевой опасностью для МЧС КБР, имеется акт внедрения.

4. Предложенный метод и алгоритмы калибровки радиолокационной сети по эталонному МРЛ позволяют с наименьшими финансовыми затратами контролировать достоверность радиолокационной информации сети МРЛ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371, 07.11.2017).

5. Разработанный автором метод автоматической идентификации КЯ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2017618059 от 21.06.2017) доведен до практического применения в противоградовых службах (имеется акт внедрения).

6. Разработанная автором методика автоматической калибровки МРЛ сети штормооповещения (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371 от 07.11.2017) может быть использована для калибровки существующей сети штормооповещения.

7. Разработанная автором методика сопоставления радиолокационной и наземной информации метеостанций и постов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371 от 07.11.2017) внедрена в систему метеообеспечения (акт внедрения имеется).

8. Полученные карты распределения опасных аномальных грозоградовых процессов по территории КБР использованы управлением МЧС РФ по КБР (акт внедрения имеется).

9. Результаты диссертационного исследования реализованы в общеобразовательных процессах в Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х.М. Бербекова (имеется акт внедрения)

10. Работа являлась частью исследований в 2017-2019 годы по темам НИР ФГБУ «ВГИ», в которых автор являлся научным руководителем и ответственным исполнителем.

11. Данные разработанного осадкомера (патент России № 2694274) могут быть использованы для дополнения существующей сети метеостанций и постов.

12. Предложенные методы обработки данных могут быть использованы для комплексирования радиолокационной, грозопеленгационной и наземной информации, получения синтезированных карт, обеспечивающих повышение точности и информативности метеорологической информации при решении научных и практических задач (имеется акт внедрения).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Автоматизированная идентификация навеса радиоэха градовых и градоопасных облаков, а также локализация конвективных ячеек (КЯ), измерения их характеристик, построения графиков временного хода, определения тенденции их развития, направления и скорости перемещения.

2. Результаты анализа качества радиолокационной информации на основе метода калибровки МРЛ по эталонному локатору и метода автоматической фильтрации аномального радиоэха по комплексным данным.

3. Результаты исследования градовой активности конвективных облаков.

В отличие от ранее используемых методов контроля градовой активности, исследования выполнены на основе нового метода автоматической идентификации КЯ с помощью которого был произведен математико-статистический анализ характеристик всех КЯ, зафиксированных на исследуемой территории за многолетний период.

4. Результаты статистического анализа молниевой активности в

зависимости от рельефа местности по данным грозопеленгационной сети Северного Кавказа.

В отличие от ранее выполненных работ исследование грозовой активности и параметров молний выполнено на основе деления исследуемой территории на элементарные ячейки с учетом высоты подстилающей поверхности над уровнем моря.

5. Результаты корреляционных взаимосвязей между данными МРЛ и данными наземной сети метеостанций.

Для контроля метеобстановки на защищаемых территориях предлагается дополнительно использовать информацию метеостанций и постов, выкладываемых гидрометцентрами на сайт Росгидромета, автоматически скачивая и нанося метеорологическую информацию на радиолокационную карту. В основе метода лежит идея сопоставления радиолокационной информации и данных сети метеостанций и постов.

6. Результаты комплексного анализа грозовых и радиолокационных характеристик конвективных облаков. Сопоставление многолетних статистических данных о грозовой и градовой активности исследуемой территории дает возможность определять целостность временных рядов исследуемых данных и взаимосвязь градовой и грозовой активности.

7. Рекомендации по совершенствованию технологии противоградовой защиты и штормооповещения.

Личный вклад автора:

Диссертация в целом является результатом самостоятельной работы автора, который обобщил полученные лично им и совместно с научным консультантом результаты. Личный вклад автора состоит в разработке новых методов: калибровки МРЛ, локализации КЯ и идентификации навеса радиоэха, фильтрации аномального радиоэха и осадкомера нового типа. Сбор и обработка экспериментальных данных, теоретическая проработка поставленных задач выполнены лично автором. Все выносимые на защиту положения основаны на самостоятельно полученных результатах. Кроме того, автор подготовил материалы статей и выступлений, сформулировал основные выводы и заключения по работе.

Автор также участвовал во внедрении результатов диссертационного исследования при расширении радиолокационной сети штормооповещения, модернизации программного обеспечения в противоградовых службах и в процессе обучения специалистов по АВ.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации докладывались:

- на 9-й Международной научной конференции ВМО по модификации погоды (г. Анталия, 2006 г.);
- на научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий (г. Нальчик, 2007 г.)

- на Всероссийской конференции по физике облаков и АВ на гидрометеорологические процессы (г. Санкт Петербург, 2008 г.);
- на конференции молодых ученых Кабардино-Балкарского научного центра РАН (г. Нальчик, 2008 г.);
- на Всероссийской конференции молодых специалистов, посвященной 50-летию юбилею НПО «Тайфун» (г. Обнинск, 2010 г);
- на научно-практической конференции, посвященной 45-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий (г. Нальчик, 2011 г.);
- на конференции молодых ученых Высокогорного геофизического Института, посвященной 100-летию профессора Г.К. Сулаквелидзе (г. Нальчик, 2012 г);
- на Международной научно-практической конференции преподавателей, научных работников и специалистов (г. Воронеж, 2013);
- на Всероссийской школе-конференции молодых ученых (г. Борок, 2014);
- на Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской Высокогорной комплексной экспедиции АН СССР (г. Нальчик, 2014);
- на конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «ФНЦ «КБ НЦ РАН» Иванова П.М. (г. Нальчик, 2017);
- на Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (г. Нальчик, 2017);
- на Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Владикавказ, 2019);
- на Всероссийской конференции по атмосферному электричеству (г. Нальчик, 2019).
- на общегеофизических семинарах ФГБУ «ВГИ».

Публикации: По теме диссертации опубликованы 53 научные работы, в том числе 12 публикации в центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено два патента РФ и 9 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованной литературы. Содержит 337 страниц, 117 рисунков, 12 таблиц и список использованной литературы из 317 наименований.

Основное содержание диссертации:

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная и практическая значимость результатов и основные положения, выносимые на защиту, а также личный вклад автора.

В первой главе анализируется состояние проблемы обработки радиолокационной информации и возможности существующих радиолокационных метеорологических сетей, рассматривается ячейковая структура конвективных и слоистообразных облачных систем. Показаны существенные различия в их ячейковой структуре, местах зарождения «новых» и диссипации «старых» КЯ. Обоснована важность автоматизации идентификации КЯ и выделения в них места засева с целью предотвращения града, методики сопоставления радиолокационной и наземной информации. Поставлены задачи исследования грозоградовых облаков на основе новых методов и алгоритмов. Составлена программа диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке методов, алгоритмов и программ повышения информативности автоматизированных радиолокационных наблюдений, включая задачи идентификации облаков и облачных ячеек, автоматизации выработки места засева градовых облаков, автоматической калибровки МРЛ, фильтрации радиоэха аномальной рефракции, сопоставлению радиолокационной и наземной информации. Во второй главе приводятся ниже представленные методы и алгоритмы автоматического распознавания навеса радиоэха градовых облаков, идентификации КЯ, измерения их параметров, построения графиков временного хода, определения направления и скорости перемещения КЯ, оценки грозо- и градоопасности КЯ, получения карты явлений погоды с автоматической локализацией опасных КЯ. Приводятся также примеры идентификации КЯ разного масштаба в разных облачных системах и подробная методика определения грозо- и градоопасности исследуемых территорий в зависимости от рельефа местности.

Предлагаемая методика идентификация КЯ

Конвективная ячейка – это область радиоэха, ограниченная замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости, имеющая одну конвективную вершину и питающаяся одним восходящим потоком. КЯ в облачной системе выделяется как поле радиоэха, ограниченное замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости (Z , dBZ) и имеющее одну конвективную вершину (например, как гора, ограниченная замкнутыми изолиниями высот и имеющая свою вершину). Но в отличие от горы у облачной КЯ изменяются во времени число изолиний Z , высота, поперечные размеры, площади горизонтальных сечений, объем, пространственная конфигурация, водосодержание и вид образующихся осадков.

Задача распознавания КЯ по существу является задачей распознавания образов, которая решается по данным файла радиолокационного обзора

трехмерного пространства.

Предлагаемый метод идентификации КЯ в облачной системе включает следующую последовательность операций:

- выделение в поле радиоэха облачности точек, ограничивающих замкнутые изолинии отражаемости Z ;
- упорядочивание полученных точек и определение составных частей изолиний Z ;
- объединение составных частей в замкнутые изолинии Z ;
- выделение в поле радиоэха вершин, ограниченных замкнутыми изолиниями Z ;
- идентификацию КЯ и их нумерацию в пространстве в хронологическом порядке зарождения;
- измерение комплекса одно-, двух- и трехмерных параметров каждой КЯ;
- построение графиков временного хода параметров КЯ;
- расчет направления и скорости перемещения КЯ;
- оценку степени грозо- и градоопасности КЯ, распознавание категорий объектов воздействия;
- документирование таблиц параметров КЯ и графиков их временного хода.

Решение поставленной задачи осуществляется путем обработки трехмерных полей радиолокационных сигналов, получаемых на автоматизированном радиолокационном метеорологическом комплексе (АМРК) «АСУ-МРЛ», разработанном, как и АСУ «Антиград» под руководством Абшаева М.Т., программное обеспечение которого позволяет получить с цикличностью 3,5 мин. объемный файл обзора, содержащий осредненные и оцифрованные радиолокационные сигналы в 360 секторах азимута (с шагом 1 градус), 400 каналах дальности (с шагом 0,5 км) и 18 (или 24) углах обзора (с переменным шагом), а также полярные координаты этих сигналов (азимут, угол возвышения, дальность). Для других систем таких как «Мерком», разработанной Атабиевым М.Д. и Шаповаловым В.А., а также для «Метеоячейки» (Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Кузнецова Л.И), эти параметры отличаются, но это не мешает использовать методику для применения в данных автоматизированных системах.

Радиолокатор МРЛ-5 имеет два частотных канала с длинами волн $\lambda_1 = 3,2$ и $\lambda_2 = 10$ см, радиолокационная отражаемость на которых рассчитывается по формулам:

$$Z_{3,2n} = 115,3 + N_{3,2} + \Delta N_{3,2ав} + 2k_R + 2\sum_{i=1}^{n-1}(k_r + k_{oc} + k_o)\Delta R + 20\lg R_n - 10\lg C_{3,2}, \quad (1)$$

$$Z_{10n} = 135,7 + N_{10} + \Delta N_{10авк} + 2k_R + 2\sum_{i=1}^{n-1}(k_r + k_{oc} + k_o)\Delta R + 20\lg R_n - 10\lg C_{10}, \quad (2)$$

где $Z_{3,2n}$ и Z_{10n} – радиолокационная отражаемость на длинах волн 3,2 и 10 см (dBZ); $N_{3,2n}$ и N_{10n} – мощность радиоэха (dB) на длинах волн 3,2 и 10 см, соответственно; $\Delta N_{3,2авк}$ и $\Delta N_{10авк}$ – поправки на изменение потенциала МРЛ

по данным автокалибровки (dB); k_R – коэффициент ослабления в ветрозащитном укрытии антенны (dB), рассчитываемый по формуле:

$$k_R = 0,042J + 0,74 \quad (3)$$

где J – интенсивность осадков над ветрозащитным укрытием (мм/час).

k_r – коэффициент ослабления (dB/км) в газах атмосферы, рассчитываемый по формулам:

$$- \text{ для } \lambda = 3,2 \text{ см: } k_{3,2r} = 1,722 \left\{ \left(0,4 + 3,45e^{-\frac{\alpha}{1,8}} \right) \left(1 - e^{-R/[27,8+154e^{-\frac{\alpha}{2,2}}]} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$- \text{ для } \lambda = 10 \text{ см: } k_{10r} = \left(0,4 + 3,45e^{-\frac{\alpha}{1,8}} \right) \left(1 - e^{-R/[27,8+154e^{-\frac{\alpha}{2,2}}]} \right). \quad (5)$$

где k_o и k_{oc} – коэффициенты ослабления (dB/км) в газах атмосферы, облаках и осадках, соответственно, рассчитываемые по формулам:

$$k_{3,2n} = 10^{0,062Z3,2n - 3,32} \text{ дБ/км}; \quad (6)$$

$$k_{10n} = 10^{0,063Z10n - 3,32} \text{ дБ/км}; \quad (7)$$

где $10lgC_{3,2}$ и $10lgC_{10}$ – константы 3,2 и 10 см каналов МРЛ.

Все пространство радиолокационного обзора разбивается на объемы по $500 \times 500 \times 500 \text{ м}^3$ и, используя метод линейной аппроксимации, рассчитываются значения Z во всех точках пространства с координатами x , y , z . Область радиолокационного обзора можно представить как набор горизонтальных сечений – матриц 800×800 через каждые 500 м высоты над уровнем расположения МРЛ. Для построения горизонтальных сечений осуществляется расчет отражаемости в каждой точке площади обзора на заданной высоте z :

– перебор всех точек матрицы и нахождение их азимута Az , расстояния от МРЛ до сканируемой точки R и угла возвышения α , относящихся к заданной высоте производится по выражениям:

$$\begin{aligned} Az &= \arctg \frac{y}{x}, \\ R_{xy} &= \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \alpha &= \arctg \frac{z}{R_{xy}}, \\ R_{xyz} &= \sqrt{R_{xy}^2 + z^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

– по вычисленным значениям α , Az и R для каждой точки пространства находится 8 ближайших точек из цикла радиолокационного обзора (ближе, дальше, слева, справа, сверху и снизу):

$$\begin{aligned} &(\alpha_1, Az_1, R_1), (\alpha_1, Az_1, R_2), \\ &(\alpha_1, Az_2, R_1), (\alpha_1, Az_2, R_2), \\ &(\alpha_2, Az_1, R_1), (\alpha_2, Az_1, R_2), \\ &(\alpha_2, Az_2, R_1), (\alpha_2, Az_2, R_2), \end{aligned} \quad (9)$$

Далее осуществляется преобразование сферических координат этих точек в декартовы:

$$\begin{aligned} z_1 &= R_1 * \sin(\alpha_1), \\ x_1 &= R_1 * \cos(\alpha_1) * \cos(Az_1), \\ y_1 &= R_1 * \cos(\alpha_1) * \sin(Az_1), \end{aligned} \quad (10)$$

Затем определяется расстояние до рассматриваемой точки:

$$r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (11)$$

и на основе линейной интерполяции рассчитывается значение Z в заданной точке с учетом вклада ближайших точек Z_1 и Z_2 в зависимости от удаления r_1 и r_2 , рассчитывается по формуле:

$$Z = Z_1 + (Z_2 - Z_1) \frac{r_1}{r_1 + r_2} \quad (12)$$

Эта процедура осуществляется для каждой точки пространства, в результате чего получается набор данных, соответствующих 40 горизонтальным сечениям, следующим через каждые 500 м высоты.

Для реализации предлагаемого метода идентификации КЯ осуществляется:

- формирование трехмерной матрицы значений Z во всех точках виртуального пространства x, y, z размером $400 \times 400 \times 20$ км, содержащей горизонтальные сечения на 40 уровнях высот;

- построение карты максимальной отражаемости;

- последовательное сканирование точек виртуального пространства по x, y с шагом 0,5 км с целью выделения границ КЯ (западной, восточной), определяемых по заданным порогам изолиний Z .

Получаемая при этом последовательность координат x, y представляет собой пары точек начала и конца изолинии Z в каждой строке матрицы данных. Хотя в одной строке пары точек одной КЯ могут быть перемешаны с парами точек другой КЯ, составные части каждой КЯ восстанавливаются следующим образом:

а) рассматриваются полученные при переборе первые две точки, соответствующие южному краю первого подмножества, множества точек КЯ № 1, имеющих координаты $x_{31}, x_{31}, x_{B1}, x_{B1}$, где индексы «3» и «В» означают западную и восточную границы КЯ, соответственно. При этом значение y_{31} всегда равно y_{B1} ;

б) следующие две точки проверяются на принадлежность к контуру множества КЯ № 1. Если при $y_{31} - 1 = y_{32}, x_{31} < x_{32} < x_{B1}$ или $x_{31} < x_{B2} < x_{B1}$ или же $x_{31} > x_{B1}$ и $x_{32} > x_{B2}$, то получаем следующие две точки первого контура КЯ. Если это условие не выполняется, то имеем дело либо с концом подмножества, либо с новым подмножеством точек КЯ №1. Таким образом, можно получить набор пар точек, определяющих границу подмножества множества точек КЯ в последовательности с юга на север и с запада на восток

На следующем этапе необходимо упорядочить точки, ограничивающие полученные множества пар точек, так как на первом этапе получена не

последовательность точек, а набор пар точек. Зная количество пар точек, входящих в подмножество, можно их разделить на западные и восточные границы подмножества и расставить по порядку. В результате этого выделяется контур подмножества.

Для объединения подмножеств в единое множество необходимо сравнить северные и южные пары точек всех подмножеств со всеми параллельными точками текущего подмножества на предмет принадлежности пар точек одного подмножества другому подмножеству одной и той же КЯ и объединить каждый контур сплошными линиями, имеющими цвет в соответствии с принятой палитрой цветов отображения полей отражаемости Z.

Нумерация КЯ: после выделения КЯ им присваиваются номера, начиная с № 1 в начале каждых суток наблюдений. При обнаружении многоячейковой облачной системы в первом цикле радиолокационного обзора нумерация КЯ осуществляется с запада на восток, с севера на юг (т.е. № 1 присваивается самой северо-западной КЯ, а последний номер присваивается КЯ, расположенной юго-восточнее всех). В последующих циклах обзора номера присваиваются в хронологическом порядке обнаружения КЯ (см. Рисунок 1). Номера присваиваются КЯ, площадь горизонтального сечения которых превышает пороговое значение (например, 10 км²).

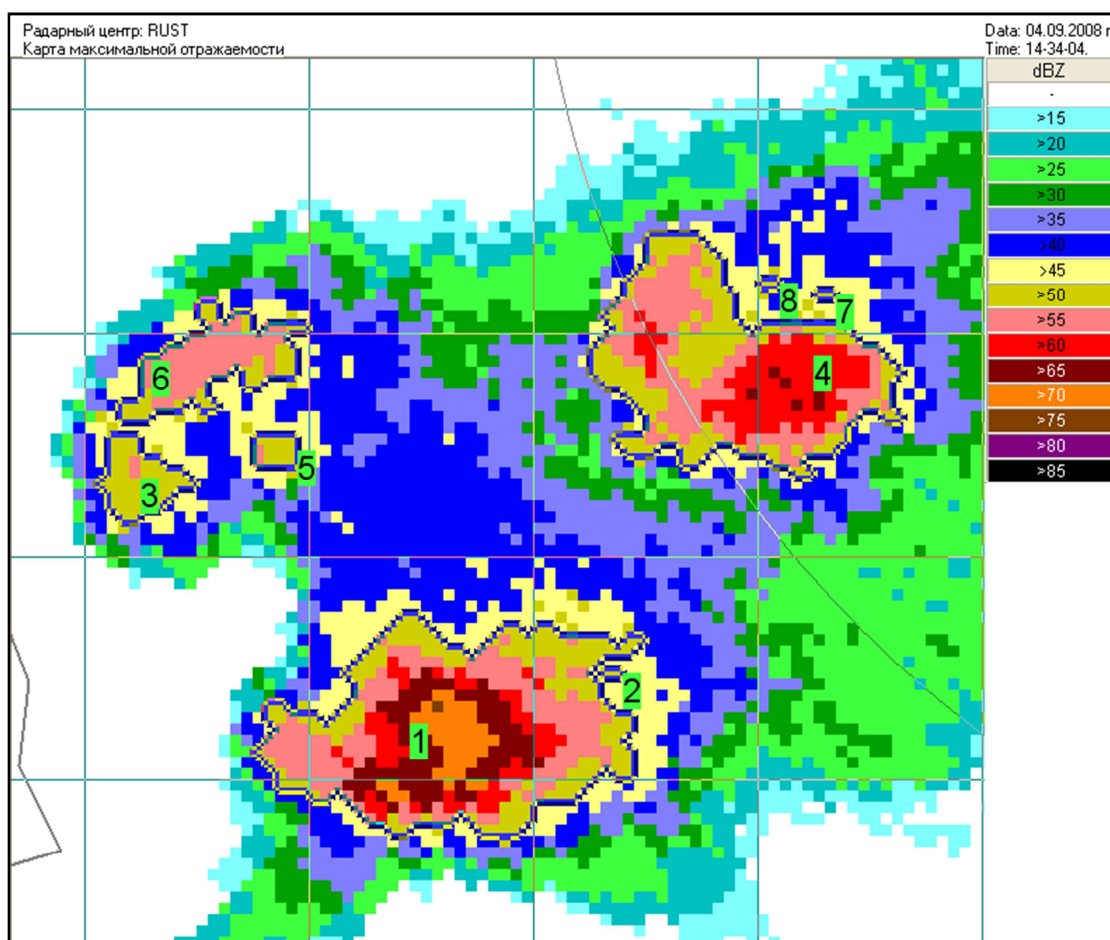


Рисунок 1 – Карта максимальной отражаемости с идентификацией и нумерацией КЯ.

При разделении КЯ на две, номер материнской ячейки сохраняется за той, к которой ближе центр масс, а второй КЯ присваивается следующий в хронологическом порядке номер. Такой подход позволяет анализировать градовые процессы в автоматическом режиме и является одним из этапов полной автоматизации АВ.

Определение направления и скорости перемещения КЯ осуществляется по перемещению координат центра масс, рассчитываемых для каждой КЯ с учетом пространственного распределения их полей отражаемости по формулам:

$$x_{n,t} = \frac{\sum_{P_i \in C_n} (z_i \cdot x_i)}{\sum_{P_i \in C_n} x_i}; \quad y_{n,t} = \frac{\sum_{P_i \in C_n} (z_i \cdot y_i)}{\sum_{P_i \in C_n} y_i}, \quad (13)$$

где $x_{n,t}$ и $y_{n,t}$ – координаты центра масс n -й КЯ в момент времени t ; x_i и y_i – координаты множества точек, принадлежащих n -й КЯ.

Скорость и направление перемещения центра масс каждой ячейки между циклами обзоров вычисляется по формулам:

$$V_{n,t} = \frac{L_{n,t}}{\Delta t}, \quad (14)$$

$$A_{n,t} = \arctg \frac{y_{n,t} - y_{n,t-1}}{x_{n,t} - x_{n,t-1}}, \quad (15)$$

где $V_{n,t}$ и $A_{n,t}$ – скорость и направление перемещения центра масс КЯ, соответственно; Δt – временной интервал между циклами обзора равный 3 мин.; $L_{n,t}$ – смещение центра масс КЯ за время между двумя последовательными циклами обзора, рассчитанное по формуле:

$$L_{n,t} = \sqrt{(x_{n,t} - x_{n,t-1})^2 + (y_{n,t} - y_{n,t-1})^2}. \quad (16)$$

Комплексный анализ полей радиоэха позволяет своевременно обнаружить зарождение новых КЯ. Если при анализе точек, входящих в КЯ, обнаружено увеличение площади поля радиоэха, то осуществляется проверка его на предмет существования в таблице параметров. Если в таблице существует КЯ с центром масс на расстоянии меньшем, чем поперечные размеры радиоэха КЯ, то считается, что КЯ существовала, но переместилась. В случае зарождения нового пространственно изолированного радиоэха или замкнутых контуров в поле радиоэха существующих КЯ и их центр масс не соответствует по расстоянию центру масс ни одной ранее зафиксированной КЯ, то считается, что произошло зарождение новой КЯ, и ей присваивается очередной номер.

Предложенный метод существенно отличается от используемого в оперативной практике противоградовой защиты, а также других автоматизированных систем (например, Титан) тем, что он позволяет автоматизировать процесс АВ, но при этом ориентирован, прежде всего, на статистические исследования градовой активности исследуемой территории.

Измерение параметров КЯ: после решения задачи выделения КЯ автоматически измеряются их параметры (рис.2). В существующих автоматизированных радиолокационных системах для измерения параметров ячейки нужно вручную локализовать КЯ, в пределах которой далее автоматически рассчитываются параметры КЯ путем сканирования всех точек пространства от уровня местоположения МРЛ до высоты 20 км над уровнем моря.

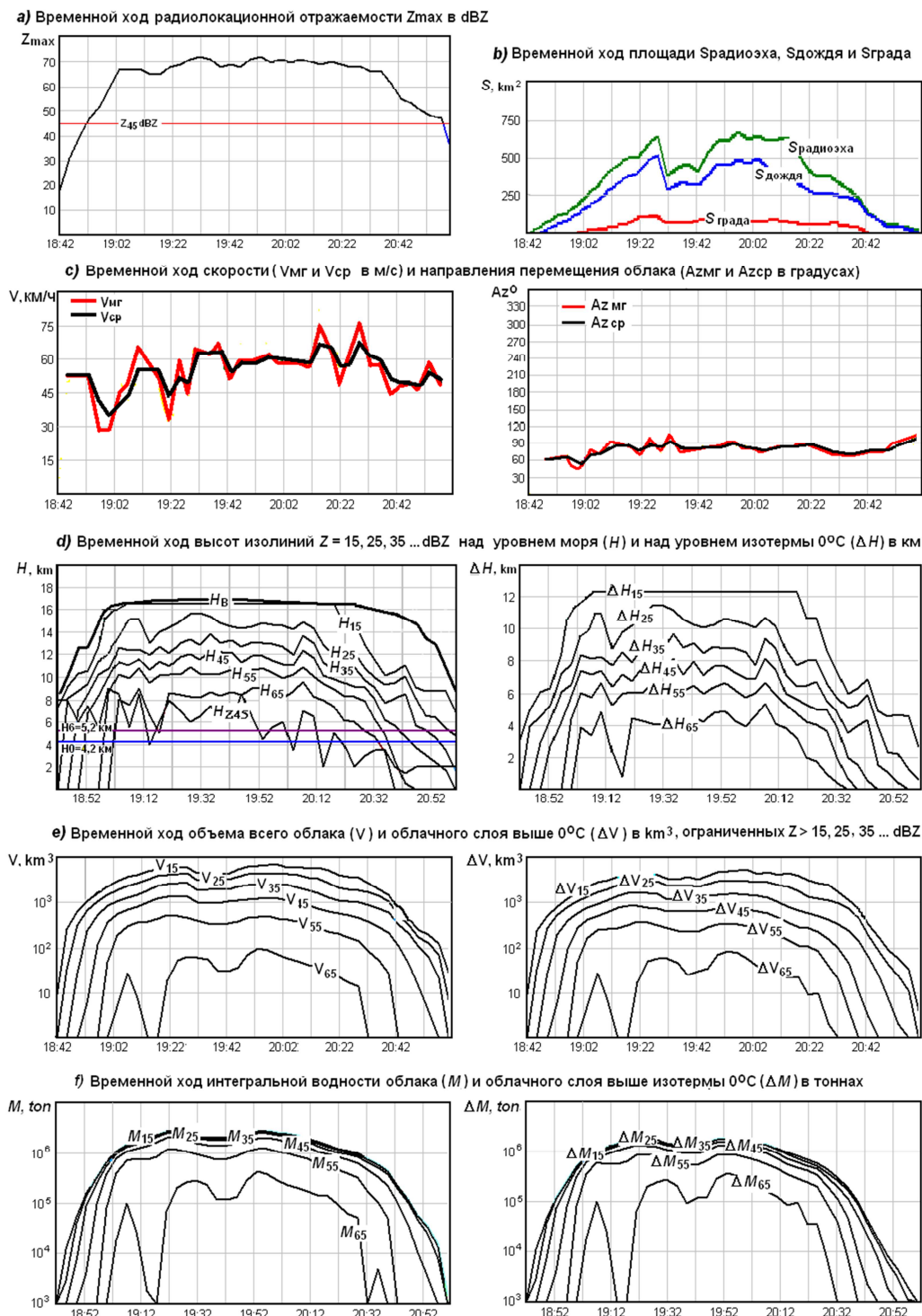


Рисунок 2 – Графики временного хода одномерных, двумерных и трехмерных параметров КЯ № 1 градового процесса, наблюдавшегося в Краснодарском и Ставропольском краях 30.08.2008 г.

Метод, алгоритмы и программа автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному МРЛ

После выделения и нумерации КЯ, ищутся КЯ, равноудаленные от эталонного и поверяемого МРЛ (см. рис. 3). Для этого, используя формулу (17), можно выразить условие равноудалённости прямой от МРЛ формулой (18). Затем, выразив x_0 соотношением (22), находим искомое уравнение прямой, равноудаленной от двух МРЛ.

$$AB = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}, \quad (17)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = (y_0 - y_2)^2 - (y_0 - y_1)^2, \quad (18)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = x_0^2 - 2x_0x_1 + x_1^2 - x_0^2 + 2x_0x_2 - x_2^2 = x_1^2 - x_2^2 + 2x_0(x_2 - x_1), \quad (19)$$

$$(y_0 - y_1)^2 - (y_0 - y_2)^2 = y_0^2 - 2y_0y_1 + y_1^2 - y_0^2 + 2y_0y_2 - y_2^2 = y_1^2 - y_2^2 + 2y_0(y_2 - y_1), \quad (20)$$

$$x_1^2 - x_2^2 + 2x_0(x_2 - x_1) = y_1^2 - y_2^2 + 2y_0(y_2 - y_1), \quad (21)$$

$$x_0 = \frac{2y_0(y_2 - y_1) + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 + x_2^2}{2(x_2 - x_1)}, \quad (22)$$

где (x_1, y_1) , (x_2, y_2) - координаты эталонного и калибруемого МРЛ, соответственно.

Далее проверяют попадание Z_{max} КЯ в область, равноудаленную (плюс минус 5 км) от двух МРЛ, т.е. среднюю зону (СЗ). В основе данного метода лежит идея подсчёта количества пересечений горизонтального луча, исходящего из точки Z_{max} КЯ со сторонами многоугольника. Точка не принадлежит многоугольнику, если количество пересечений четное.

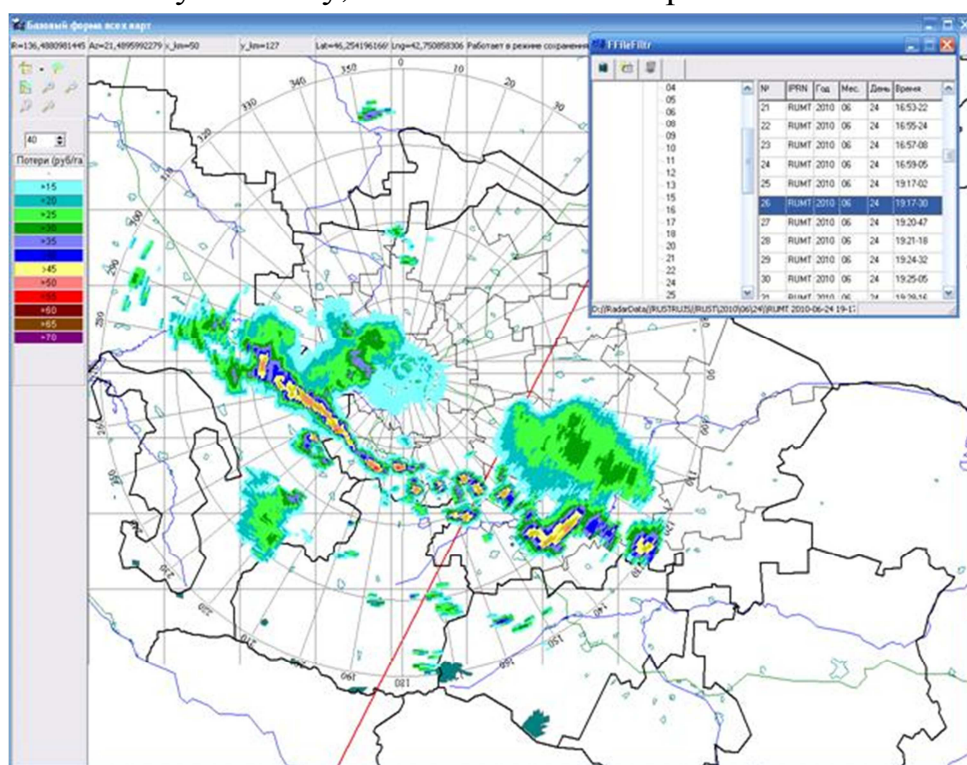


Рисунок 3 – Карта с отображением линии, равноудаленной от двух МРЛ в случае маломощных КЯ.

1. Для этого перебираются все соседние $A[n]$ и $A[n+1]$ пары вершин многоугольника. Если координаты рассматриваемой КЯ Z_{max} попадают между текущими вершинами, то можно пустить луч в одну из сторон, параллельный оси X .

2. Далее проверяется пересечение луча с отрезком $A[n] - A[n+1]$. Для этого:

- используется уравнение прямой, проходящей через точки $A[n]$ и $A[n+1]$

$$\frac{X - A[n].X}{A[n+1].X - A[n].X} = \frac{Y - A[n].Y}{A[n+1].Y - A[n].Y} \quad (23)$$

- значение X выражаются формулой:

$$X = \frac{(Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X)}{A[n+1].Y - A[n].Y} + A[n].X \quad (24)$$

- вместо X , Y подставляются координаты нашей точки. При этом, если

$$X > \frac{(Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X)}{(A[n+1].Y - A[n].Y)}, \quad (25)$$

то точка находится правее по оси X от отрезка $A[n] - A[n+1]$ и имеется пересечение с выделенной областью.

3. Если общее количество пересечений – четное, то точка лежит снаружи многоугольника.

На рис. 4 приведены примеры карт с попаданием как маломощных, так и мощных КЯ в среднюю зону.

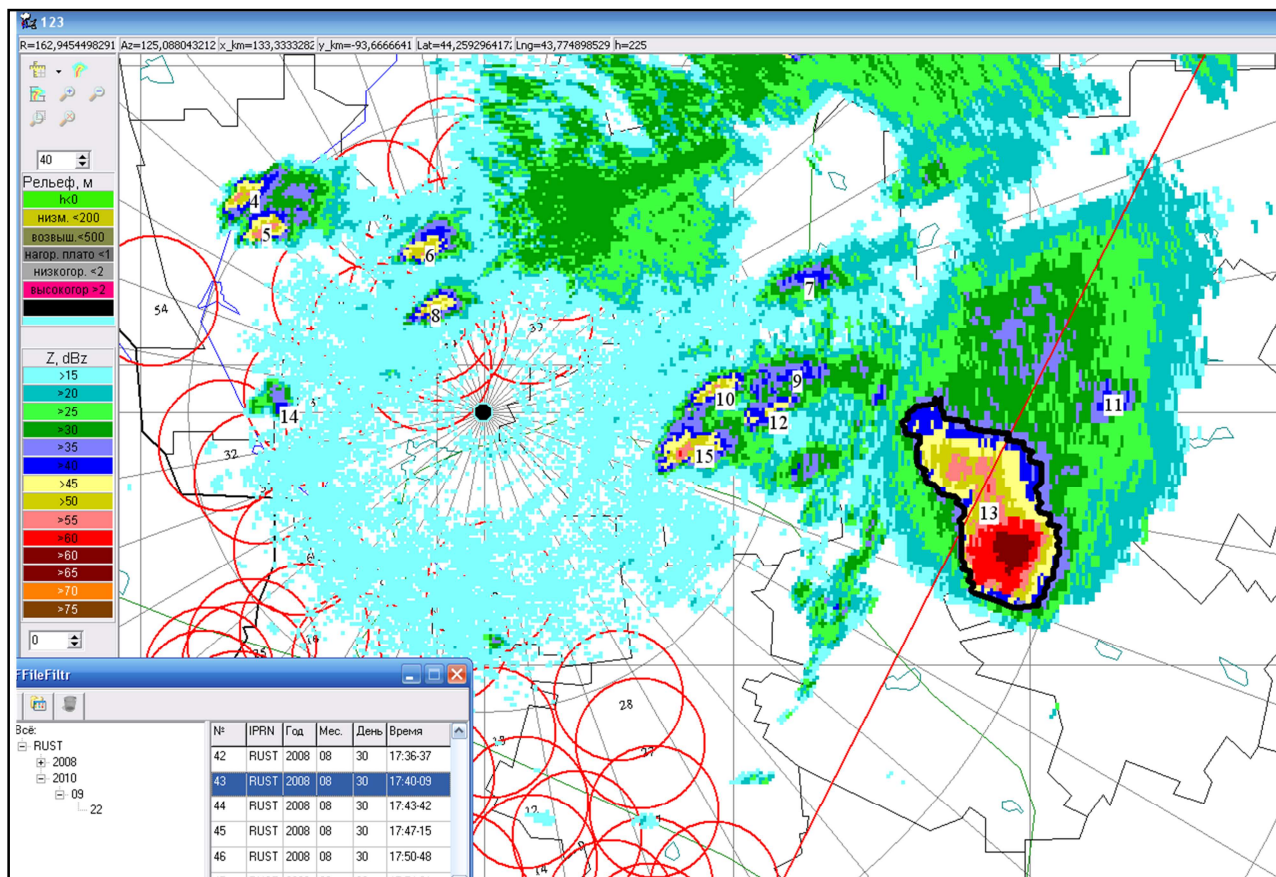


Рисунок 4 - Карта с отображением линии, равноудаленной от двух МРЛ с попаданием в СЗ мощной КЯ.

Методы и алгоритм фильтрации аномального радиоэха:

Для фильтрации радиоэха местных предметов, появляющихся в условиях аномальной рефракции радиоволн, в автоматическом режиме работы сети штормооповещения, прежде всего, необходимо определить момент появления аномального радиоэха. Для этого была разработана методика автоматического распознавания радиоэха от местных предметов, включающая следующие операции:

1) Перевод географических координат МРЛ в декартовые координаты другого МРЛ.

2) Перевод координат двух и более МРЛ из декартовой системы координат в сферические координаты относительно эталонного МРЛ.

3) Нахождение общих точек для двух или нескольких МРЛ.

4) Определение момента появления аномальной рефракции по разности отражаемостей на двух и более МРЛ.

5) Определение области аномального радиоэха по разности в каждой точке значений Z для разных МРЛ.

Перевод географических координат в декартовы и необходимые преобразования выполняются по формулам:

$$l = L_2 - L_1, \quad (24)$$

$$p = \sin l * \cos B_2, \quad (25)$$

$$q = \cos B_1 * \sin B_2 - \sin B_1 \cos B_2 * \cos l, \quad (26)$$

$$Az = a \tan\left(\frac{p}{q}\right), \quad (28)$$

$$R = a \tan\left(\frac{p * \sin Az + q * \cos Az}{\sqrt{1 - (p * \sin Az + q * \cos Az)^2}}\right) * 6371.117, \quad (29)$$

$$X = R * \sin Az \quad (30)$$

$$Y = R * \cos Az \quad (31)$$

Здесь B_2 , L_2 и B_1 , L_1 – широта и долгота точки стояния МРЛ и точки, принятой за центр карты, соответственно; X , Y – координаты точки B_2 L_2 , переведенные в декартову систему относительно точки B_1 L_1 . Координаты позиции одного из МРЛ принимаются за центральную точку карты. Координаты другого МРЛ переводятся в декартову систему координат относительно первого МРЛ. Далее сферические координаты МРЛ переводятся в декартовы

$$dx = \rho \cos \theta * \cos(90 - \varphi), \quad (32)$$

$$dy = \rho \cos \theta * \sin(90 - \varphi), \quad (33)$$

$$dz = \rho \sin(\theta), \quad (34)$$

$$X = x + dx, \quad (35)$$

$$Y = y + dy. \quad (36)$$

Где φ – азимут, ρ – расстояние от МРЛ до сканируемой точки, θ – угол возвышения антенны.

Полученные значения координат X , Y переводятся в сферические относительно первого МРЛ по следующим формулам:

$$\rho' = \sqrt{X^2 + Y^2 + dz^2}, \quad (37)$$

$$\varphi' = 90 - a \tan\left(\frac{Y}{X}\right), \quad (38)$$

$$\theta' = a \sin\left(\frac{\rho}{\rho'}\right) * \sin \theta. \quad (39)$$

После пересчета координат точек размещения обоих МРЛ в декартову систему координат по формулам (32 – 36) находятся близлежащие точки с координатами $(X_1 \ Y_1 \ Z_1)$ и $(X_2 \ Y_2 \ Z_2)$ и расстояния между этими точками по формуле

$$dL = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}. \quad (40)$$

Для анализа радиолокационной информации двух МРЛ без фильтрации аномального радиоэха подбираются файлы обзора, время которых отличалось не более чем на 5 минут. Если в ночные и утренние часы, когда наиболее часто наблюдаются условия аномальной рефракции и в близлежащих точках есть разница $\Delta Z > 40$ dBZ, то реальным считается наименьшее из двух значений. Когда имеется свыше 50 – 60 точек с $\Delta Z > 30$ dBZ, можно утверждать, что имеет место явление аномальной рефракции.

Предложенный метод позволяет фильтровать информацию об аномальной рефракции с использованием информации от нескольких МРЛ.

Метод фильтрации аномальной рефракции в местах появления представляет собой полуавтоматический режим фильтрации, применимый в случае отсутствия зон перекрытия областей аномальной рефракции радиусами обзора двух или более МРЛ. Данный метод предлагается реализовывать следующим образом:

- в ручном режиме один раз необходимо локализовать области появления радиоэха аномальной рефракции и занести их координаты в базу данных;
- если эти области расположены в зоне перекрытия двух и более МРЛ, ввести опцию автоматического сравнения радиоэха псевдо КЯ по данным разных МРЛ и области радиоэха в точках, где разница $Z > 40$ dBZ, обнулить.
- если область появления аномального радиоэха находится в зоне обзора только одного МРЛ, то следует обнулять радиоэху в областях, занесенных в базу данных, в заданных нижних углах обзора, которые также внесены в базу данных. При этом углы обзора, при которых осуществляется обнуление аномального радиоэха, должны плавно нарастать, чтоб уменьшить вероятность потери полезных данных. База данных для каждой группы местников должна храниться в отдельном файле. Выделенные области аномального радиоэха вырезаются только до заданного угла места на заданном участке.

Такая фильтрация аномального радиоэха периодически отключается. Если при отключенной фильтрации аномальное радиоэхо не появляются, то файлы с рефракционными данными удаляются.

Определение грозо- и градоопасности территорий является актуальной задачей при планировании противогодовой защиты и расширении защищаемых территорий, а также выборе конструкции системы грозозащиты объектов. Предложенный метод определения грозоградской активности территории включает в себя:

- создание трех матриц 832×832 , соответствующих разбиению площади обзора МРЛ (416 км^2) на ячейки размером $0,5 \times 0,5 = 0,25 \text{ км}^2$;
- преобразование данных о высоте рельефа над уровнем моря всех ячеек в радиусе обзора МРЛ из географических координат в декартовы и их занесение в первую матрицу;
- построение карты рельефа местности;
- подключение архива грозопеленгационных данных и внесение во вторую матрицу данных о грозовых разрядах «облако-облако», «облако-земля» положительной и отрицательной полярности, значений максимального, среднего, минимального тока разрядов, отмеченных на высотах: 0 - 200 м; 200 - 500 м; 500 - 1000 м; 1000 - 2000 м и более 2000 м;
- подключение архива радиолокационных данных, выбор из него и внесение в матрицу 3 значений Z_{max} в радиусе 3 км от грозовых разрядов в каждом интервале времени и подсчет средних и максимальных значений Z за месяц и сезон.

В результате такой обработки информации был изучен временной ход частоты гроз и града за месяц, год или несколько лет в любой части исследуемой территории в зависимости от высоты местности, а также построены на фоне карты рельефа:

- карты территориального распределения частоты молниевых разрядов любого типа и интенсивности, по которым можно выделить наиболее грозоопасные месяцы, годы и высоты над уровнем моря (см. пример на рис. 5);
- карту повторяемости града, по которой можно оценить градоопасность территории и выделить районы наиболее подверженные выпадению града.

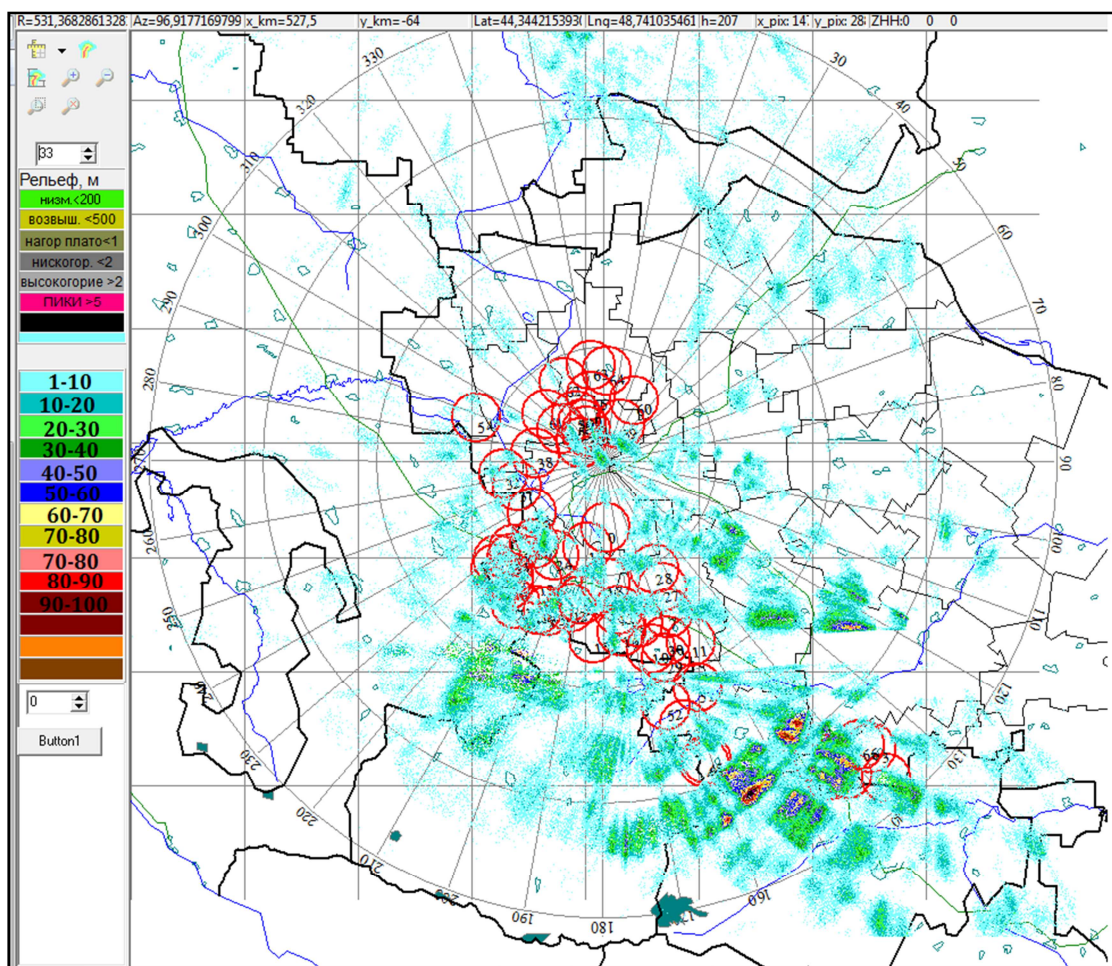


Рисунок 5 – Пример карты годового распределения гроз с молниевыми разрядами типа «облако-облако» в радиусе обзора МРЛ. На рисунке цветной индикацией обозначены диапазон количества молниевых разрядов.

Третья глава содержит результаты исследования градовой активности конвективных облаков.

Исследования облачных ячеек были проведены в различных условиях, в разные времена года и по данным разных МРЛ. Анализируемый период включает период времени с 2002 по 2020 года. Исследования показали, что алгоритм работает при любой многоячейковой облачности и при любом размере КЯ.

Используя метод автоматической идентификации, было проанализировано 173 случая активного воздействия на градовые процессы, развивавшихся на территории Ставропольского края. Анализ этих процессов позволил выявить оптимальную формулу для автоматического выделения навеса радиоэха. Область навеса радиоэха определяется по высоте максимальной отражаемости в столбе выше 5 км и значении максимальной отражаемости менее 20 dBz.

В 141 случае было проведено сравнение местоположения мест засева, выделенных предлагаемым автоматическим методом и локализованным «вручную» в соответствии с действующим руководящим документом (РД) Росгидромета. Это сравнение показало, что в подавляющем большинстве случаев ($\approx 80\%$), выделенный в автоматическом режиме навес радиоэха

совпадал с идентифицированным оператором в процессе воздействия на градовые облака. На рис. 6 слева красным цветом показана навес радиозеха, выделенный автоматическим методом, а справа – контуры площадки засева, выделенные в соответствии с действующим РД при проведении реального засева облаков.

Следует отметить, что в годы, когда проводилось такое сравнение (2007 - 2011 гг.), эффективность противоградовой защиты в Ставропольской ВС не опускалась ниже 95%.

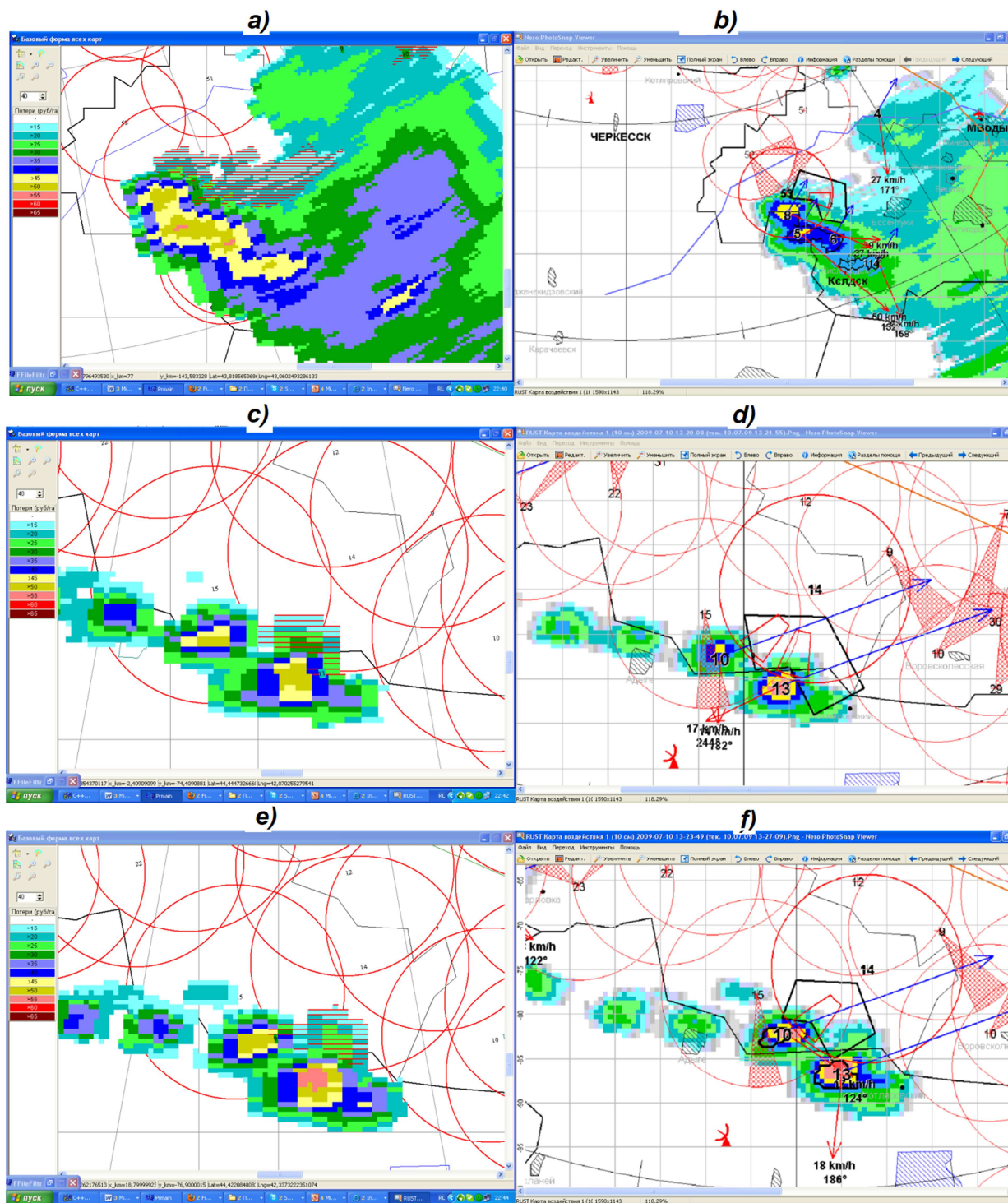


Рисунок 6 - Автоматически выделенные навеса радиозеха (a, c, e) в сравнении с выделенными вручную при воздействии на эти же ячейки (b, d, f).

По результатам исследованных 173 градовых процессов получены следующие закономерности развития навеса радиоэха:

- направление навеса радиоэха совпадает с направлением смещения КЯ.
- область создания условия для зарождения града располагается в продолжение навеса радиоэха.
- направление навеса радиоэха определяет с какой стороны от КЯ будет располагаться площадка засева.

Исследование характеристик КЯ с помощью метода автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному МРЛ:

Были проведены исследования характеристик КЯ равноудаленных от двух МРЛ, расположенных в Ставрополе (RUST) и Зеленокумске (RUJS). Автоматически полученная разница в значениях параметров, используемых для обнаружения града, показана в табл. 1 и на рис. 7. Из них следует, что значения Z_{max} , измеренные на Зеленокумском МРЛ, занижены относительно показаний Ставропольского МРЛ, принятого за эталон, в среднем на $\Delta Z_{max} = 3$ dBZ и $\Delta H_{Zmax} = 1$ км. После установления этих расхождений была введена поправка на константу поверяемого Зеленокумского МРЛ и достигнута минимизация обнаруженных расхождений.

Таблица 1 - Показания Зеленокумского и Ставропольского МРЛ.

Дата	МРЛ	Время	Z_{max}	H_{Zmax}	ΔZ_{max}	ΔH_{Zmax}
29.05.10	RUST	16:53:05	59	4	6	1,5
	RUJS	16:55:42	53	2,5		
17.06.10	RUST	13:14:55	62	4	2	2
	RUJS	13:14:25	60	6		
22.06.10	RUST	20:27:30	56	2,5	2	0,5
	RUJS	20:28:48	54	2		
24.06.10	RUST	19:17:30	54	6	4	1,5
	RUJS	19:17:02	50	4,5		
19.07.10	RUST	11:05:36	44	5	2	0,5
	RUJS	11:07:08	42	4,5		
20.08.10	RUST	22:17:03	49	4	3	0,5
	RUJS	22:18:22	46	3,5		
Среднее					3	1

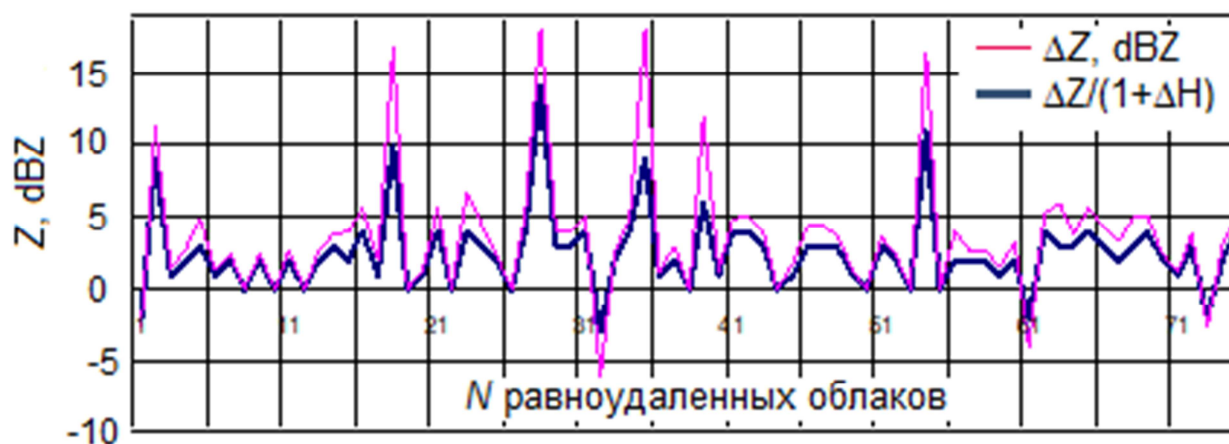


Рисунок 7 – Разница в значении радиолокационной отражаемости Z облаков, равноудаленных от эталонного и поверяемого МРЛ до коррекции (56 случаев) и после коррекции (27 случаев).

Проведенные исследования показали, что данный метод позволяет калибровать показания одного МРЛ по показаниям другого.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований грозоградовых облаков с применением разработанных методов.

С помощью метода автоматической идентификации КЯ были проведены исследования грозоградовых облаков на Северном Кавказе и в Крыму. Автоматическая обработка позволила провести статистический анализ огромного массива данных радиолокационных наблюдений Ставропольского АМРК «АСУ-МРЛ» в период с 2002 по 2009 гг., включающего 125 186 циклов обзора пространства и получить значения параметров 701 458 КЯ в более чем 324 миллиардов точек пространства размерами 500x500x500 м. Эти исследования позволили провести анализ градоопасности Северного Кавказа в разные годы, выявить наиболее градоопасный период года и суток, а также получить статистические данные о повторяемости значений различных характеристик.

Анализ показал, что из 701 458 КЯ, наблюдавшихся в течение 7 лет в радиусе 200 км вокруг Ставропольского АМРК «АСУ-МРЛ» на площади ≈ 126 тысяч км², 72,1% составляют КЯ со слабыми ливневыми дождями (с интенсивностью $J < 5$ мм/час), 23,5% КЯ с умеренными ливневыми осадками (с $5 < J < 10$ мм/час), 2,5% с сильными ливневыми осадками (с $J > 10$ мм/час) и всего 1,84% градовых КЯ, в том числе 1,2% с крупной и слабым градом, 0,6% с умеренным градом и около 0,04% с сильным градом (рис. 8б). Из рис. 8а следует, что из 12 948 градовых КЯ 64,9% являются слабыми, из которых выпадает ливневой дождь с крупной и мелким градом, не наносящим ущерба сельскохозяйственным культурам, 32,7% КЯ можно отнести к умеренным, из которых выпадает град, наносящий частичные повреждения, а 2,4% градовых КЯ сопровождаются интенсивными градобитиями со степенью повреждения сельхозкультур от 30 до 100%.

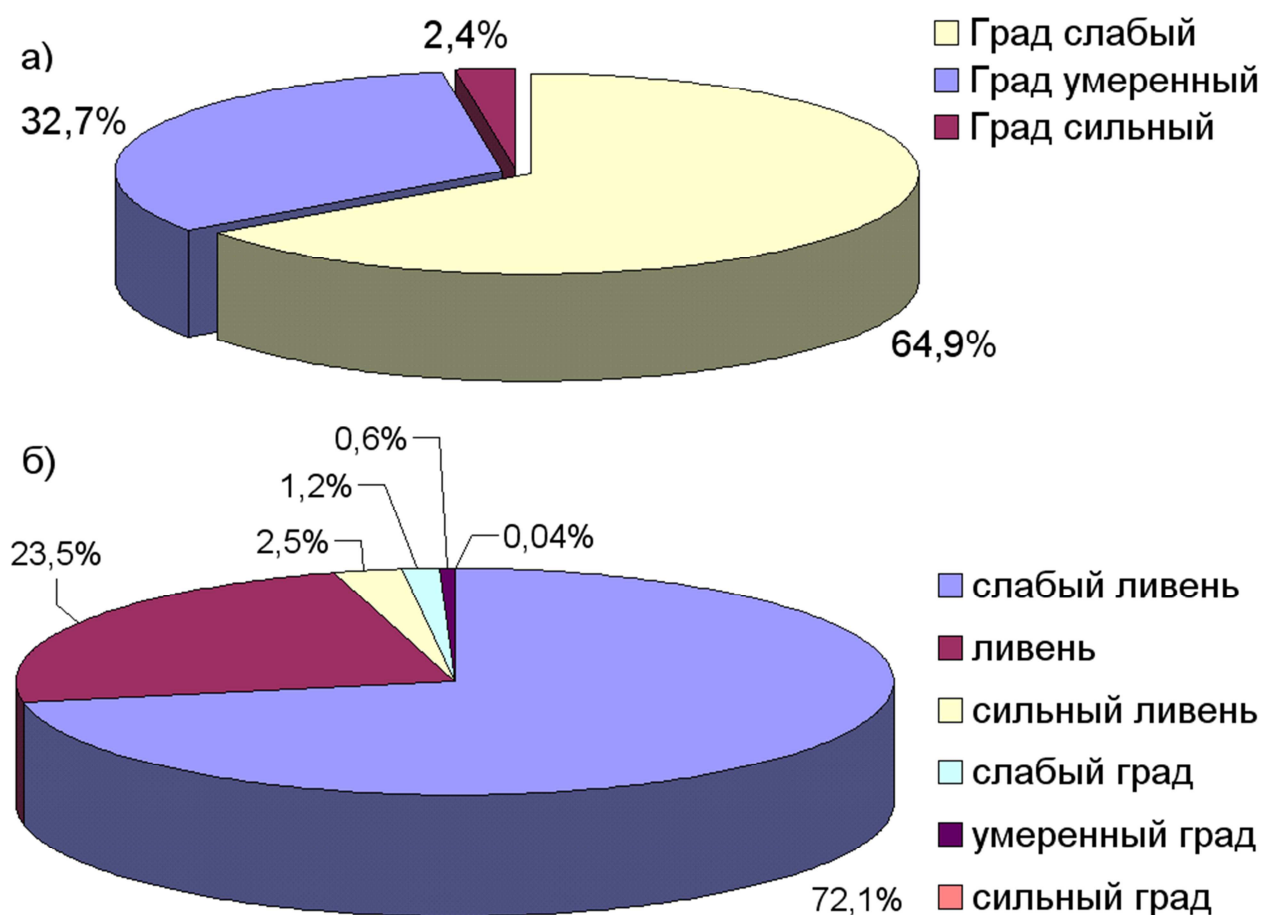


Рисунок 8 - Повторяемость КЯ с градом и ливнем разной интенсивности, осредненная за период (2002 – 2009 гг.).

Исследования многолетнего, годового и суточного хода градоопасности региона позволили достоверно сравнить разные годы по степени градоопасности, выявить наиболее градоопасный период года и суток и получить статистические данные о повторяемости значений различных характеристик КЯ.

Сравнение градовой активности разных лет показало, что в последние годы наблюдается тенденция повышения градоопасности равнинной части Северного Кавказа, что может быть обусловлено влиянием глобального потепления климата, приведшим также к увеличению количества осадков, температуры и влажности атмосферы. Из рис. 9 следует, что годовое количество градовых ячеек на территории Северного Кавказа плавно варьирует в значительных пределах. Их максимум отмечался в 2008 и 2016 годах. В целом с 2007 года число градовых ячеек увеличилось в 2 – 3 раза по сравнению с 2002 – 2005 гг. Значительно увеличилось и число мощных градовых ячеек.

Анализ *сезонного хода* градовой активности показал, что наиболее высокая градовая активность в Ставропольском крае отмечается в июне и августе, на которые приходится и основное количество осадков.

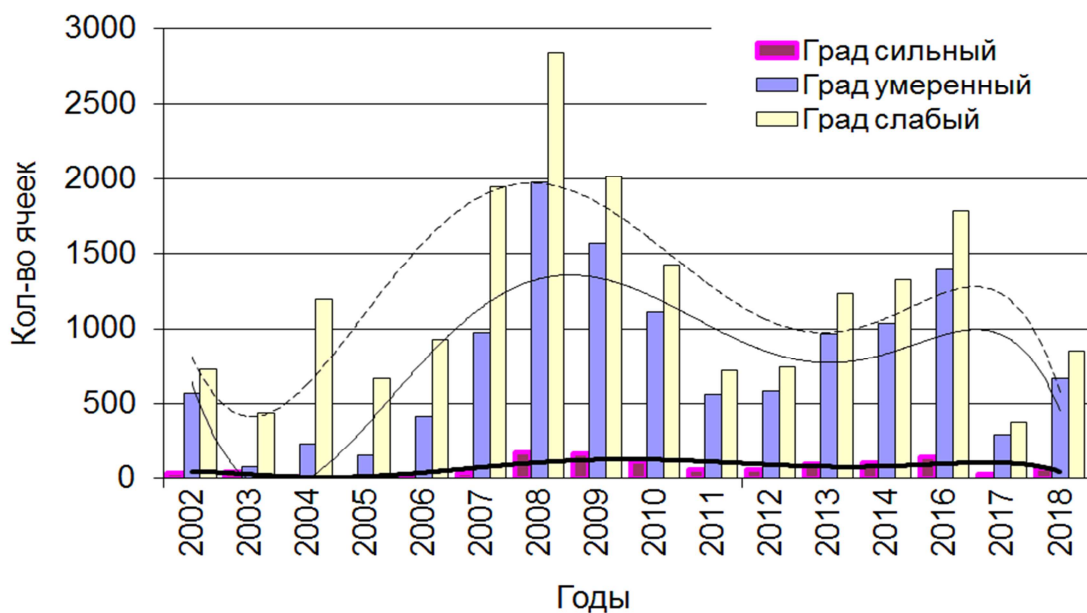


Рисунок 9 - Годовое количество градовых ячеек в 2002 - 2018 гг.

Анализ **суточного хода** показал, что град на Северном Кавказе в 2002 – 2008 гг. преимущественно наблюдается с 13⁰⁰ до 21⁰⁰ (рис. 10), а наиболее градоопасным временем суток является период с 15⁰⁰ до 19⁰⁰ с абсолютным максимумом в 17⁰⁰. Суточный ход числа градовых ячеек со слабым, умеренным и интенсивным градом (N_C , N_U и N_I , соответственно) может быть аппроксимирован полиномами 6-й степени:

$$N_C = 0,002x^6 - 0,107x^5 + 2,86x^4 - 35,1x^3 + 201x^2 - 484x + 490; \quad (41)$$

$$N_U = 0,001x^6 - 0,071x^5 + 1,923x^4 - 24,16x^3 + 144x^2 - 374x + 364; \quad (42)$$

$$N_I = 7 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,005x^5 + 0,134x^4 - 1,67x^3 + 9,75x^2 - 25,4x + 26,8, \quad (43)$$

где x – порядковый номер часа, начиная с 1.

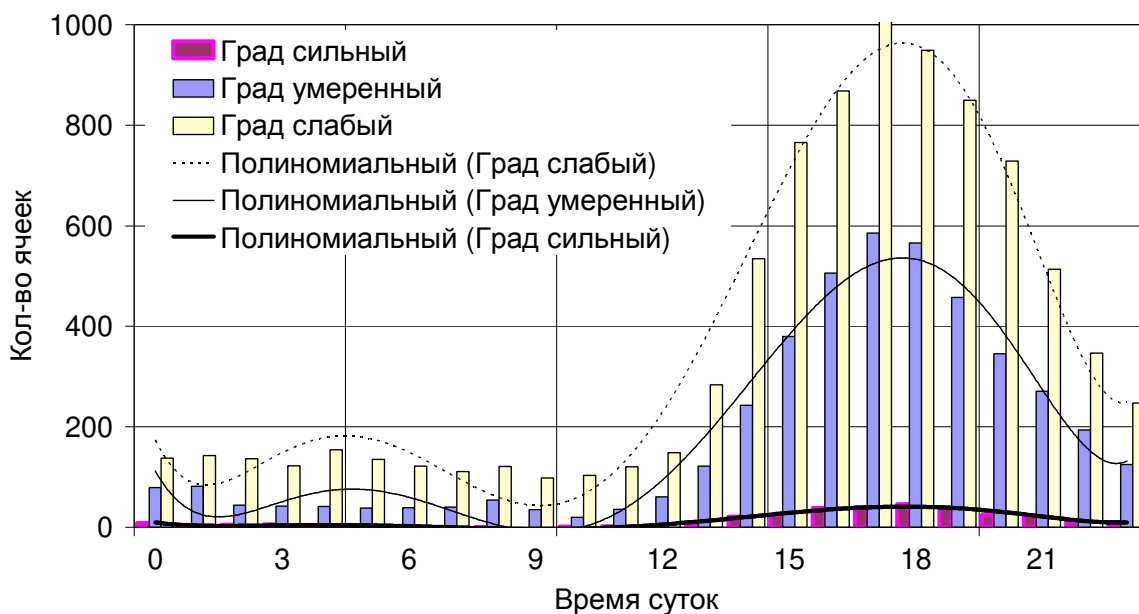


Рисунок 10 - Суточный ход градоопасности Северного Кавказа, осредненный за 2002 – 2008 гг.

Сравнение радиолокационных данных о суточном ходе частоты выпадения града, представленных на рис. 10, с данными метеостанций и постов, полученными А.М. Малкаровой для этого же региона, показало хорошее согласие данных радиолокационных и наземных наблюдений.

В диссертации представлены также результаты аналогичных исследований градоопасности территории Крыма в период с 2003 по 2009 гг. Обработано 72 873 файла обзора и установлено, что за эти годы в радиусе действия АМРК «АСУ-МРЛ» Кировского отряда Крымской противоградовой службы развивалось 12340 градовых КЯ, в том числе слабых 7639, средних 4082 и 619 мощных. В Крыму доля мощных градовых ячеек вдвое превышает их долю на Северном Кавказе, но они имеют меньшие размеры и более короткое время существования.

Для обеспечения безопасности полетов авиации в сложных метеорологических условиях важно знать данные о повторяемости опасной облачности по высотам и эшелонам полета. В качестве одного из параметров, характеризующих степень опасности облачности, взята радиолокационная отражаемость, значение которой коррелируют с наличием турбулентности, больших скоростей воздушных потоков, интенсивных осадков и грозовой активности, в том числе и опасности встречи с градом.

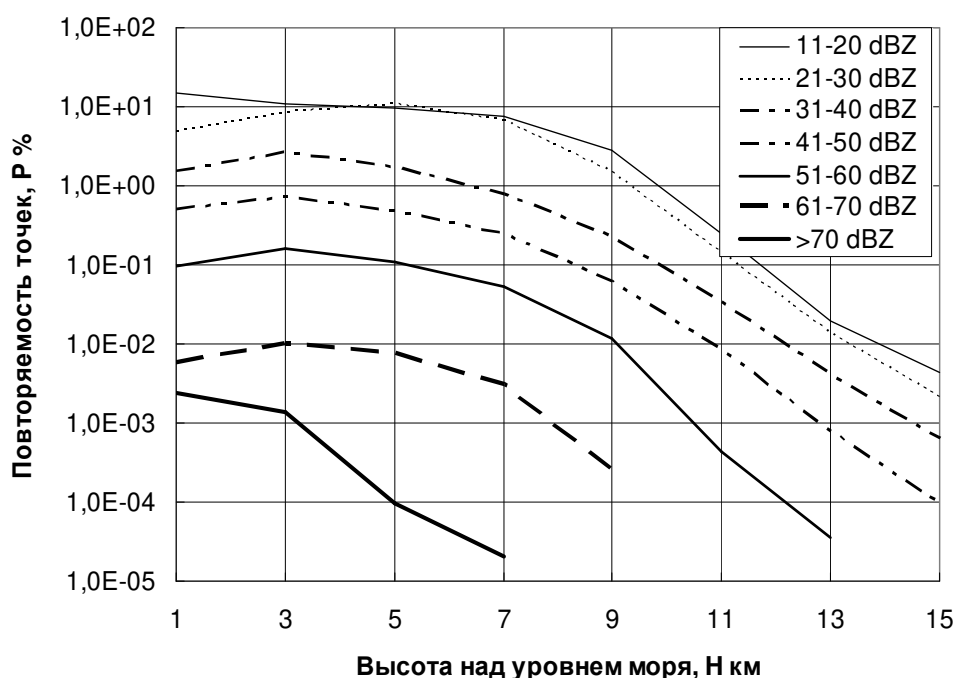


Рисунок 11 - Повторяемость значений Z_i (dBZ) в зависимости от высоты над уровнем моря, по 703 726 КЯ, наблюдавшихся в период 2002-2008 гг.

Из рис. 11 следует, что частота опасных для полетов авиации значений отражаемостей уменьшается с высотой, но вместе с тем достаточно часто отмечаются случаи, когда отражаемость $Z > 50$ dBZ, соответствующая области локализации града, в редких случаях может достигать высоты над уровнем моря 11 – 13 км. Области локализации крупного града могут

достигать высоты 7 – 9 км, хотя число пространственных точек с крупным градом не превышает 0,01% от их общего числа. Высота опасного, с точки зрения грозоопасности, уровня отражаемости с $Z > 30$ dBZ отмечается в 0,01 % случаев на высотах до 13 км. Наиболее опасным слоем кучево-дождевых облаков, как и следовало ожидать, является приземный слой до высоты 7 км, где может отмечаться крупный интенсивный град.

Исследование молниевой активности региона:

Специальной программой, разработанной для исследования грозоградовых процессов, были проведены расчеты числа молниевых разрядов, зафиксированных в 2009 – 2018 годы грозопеленгационной системой ВГИ, состоящей из 4 датчиков LS8000, расположенных в Черкесске, Ставрополе, Зеленокумске и на полигоне Кызбурун-2.

На рис. 12 представлен временной ход количества грозовых разрядов на разных высотах. Из него следует, что количество разрядов «облако-земля» и «облако-облако» на Северном Кавказе достаточно сильно варьирует по годам, и максимум отмечался в 2012 г. Установлено, что число грозовых разрядов всех типов увеличивается с высотой местности, достигает максимума на высотах от 500 до 1000 м, а потом убывает (рис. 12). Это наглядно видно на рис. 13.

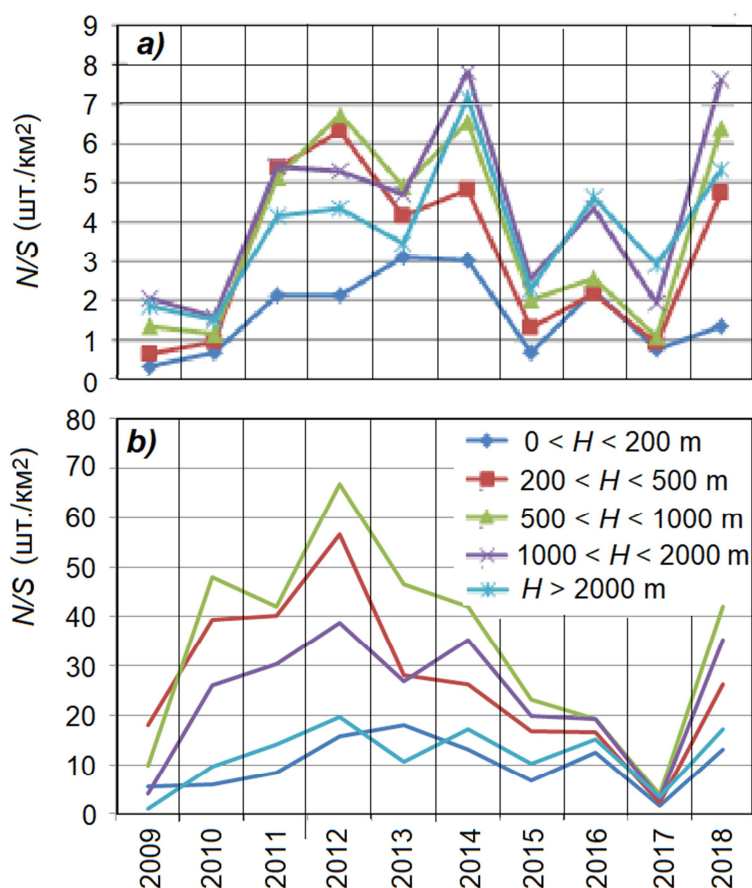


Рисунок 12 - Число грозовых разрядов, приходящихся на 1 км² местности на указанных высотах, в 2009 – 2018 г.: **a)** разряды «облако-земля» положительной (LF+) и отрицательной (LF-) полярности; **b)** разряды «облако-облако» (VHF).

Число низкочастотных разрядов «облако-земля» (LF+ и LF-) варьирует в пределах от 0,5 до 8 разрядов на 1 км^2 и примерно в 10 раз меньше числа высокочастотных разрядов «облако-облако» (VHF). При этом из 4395205 молниевых разрядов «облако-земля» 72% имели отрицательную полярность (LF-), а 28% положительную (LF+).

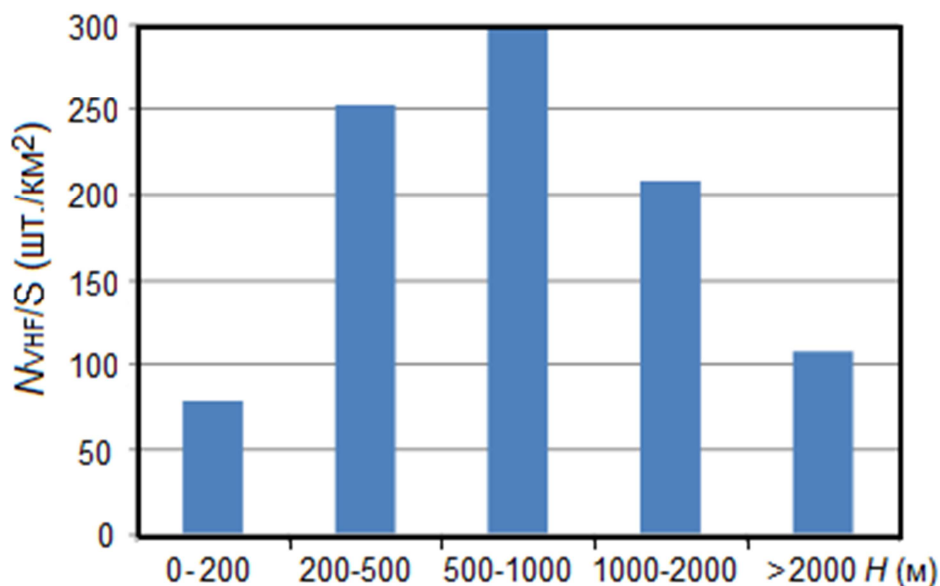


Рисунок 13 - Зависимость числа разрядов «облако-облако», приходящихся на 1 км^2 от высоты местности.

Следует отметить, что наиболее грозоопасным на всей территории Северного Кавказа является август, а в горных районах этой территории – сентябрь (рис.14).

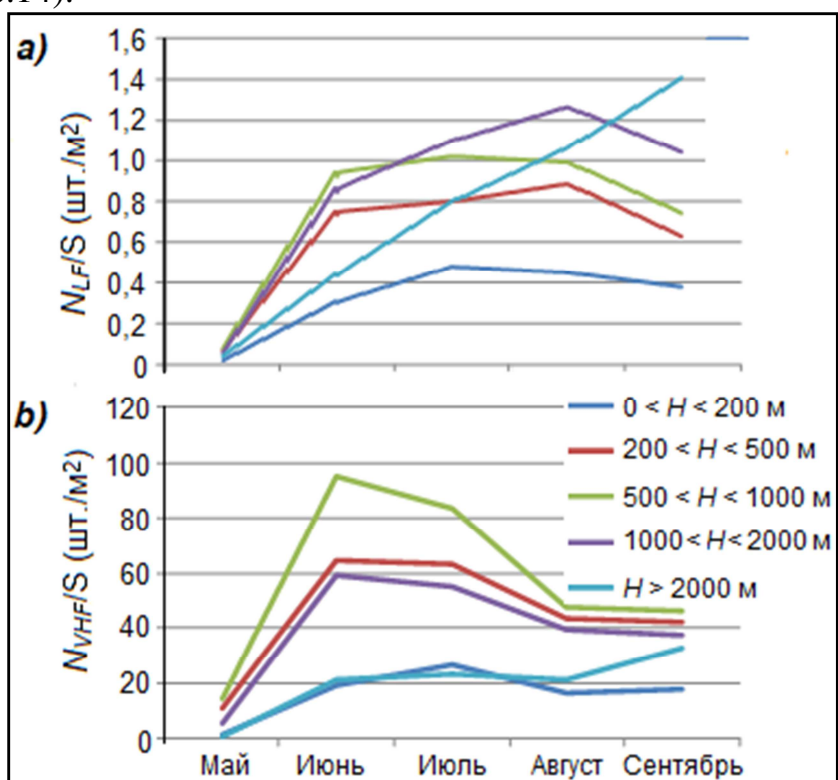


Рисунок 14 - Сезонный ход числа грозовых разрядов на 1 км^2 местности на указанных высотах: *а)* разряды «облако-земля»; *б)* разряды «облако-облако».

Статистический анализ значений токов в канале молний на территории Северного Кавказа показал, что максимальные значения положительных токов I_{max}^+ наблюдаются в июне (рис. 15a), а отрицательных I_{max}^- в августе (рис. 15b).

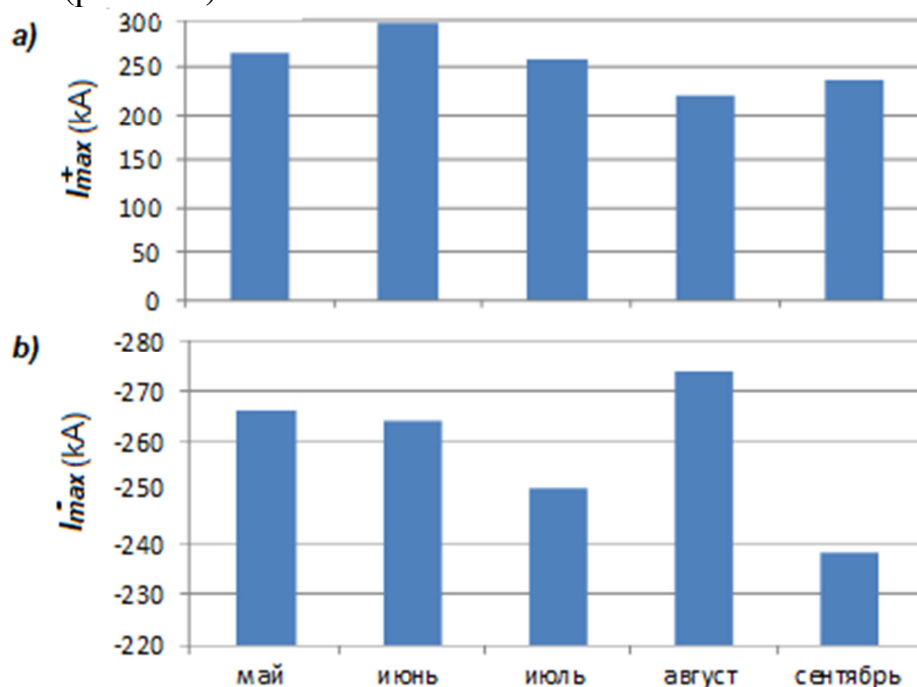


Рисунок 15 - Максимальные значения положительных (a) и отрицательных (b) токов в канале молнии, усредненные по месяцам в 2009-2019 гг.

Максимальный ток положительных разрядов, зафиксированный на исследуемой территории за 10 лет, равняется 450 кА, а максимальное значение тока отрицательного разряда, отмеченное в июле 2016 года, достигало 369 кА.

Пятая глава диссертации посвящена применению разработанных методов, повышающих информативность метеоданных как в оперативной работе на сети штормоповещения и противогодовой защите, так и в статистических исследованиях закономерностей грозоградовой активности.

С развитием техники и технологии возрастают требования к качеству получаемой и обрабатываемой метеорологической информации. У разных типов информации, используемых как в оперативной, так и архивной работах есть свои достоинства и недостатки. Современные технические средства позволяют сопрягать и комплексировать различные типы метеорологической информации, что, в свою очередь, приводит к повышению достоверности и адекватной оценке метеорологической ситуации, а также выявлению закономерностей определенных метеорологических процессов, наблюдаемых на исследуемых территориях.

В рамках данной работы были предложены способы применения разработанных методов для оптимизации процесса радиолокационных наблюдений при проведении противогодовых работ.

Для этого предлагается:

- Используя программу RadMet в автоматическом режиме, проводить мониторинг погодных условий в окрестностях, защищаемых от града

территориях (ЗТ). Программа RadMet в автоматическом режиме скачивает данные метеостанции вокруг ЗТ с официального сайта Гидрометцентра РФ <http://meteoinfo.ru> и накладывает информацию на карту местности (рис.16).

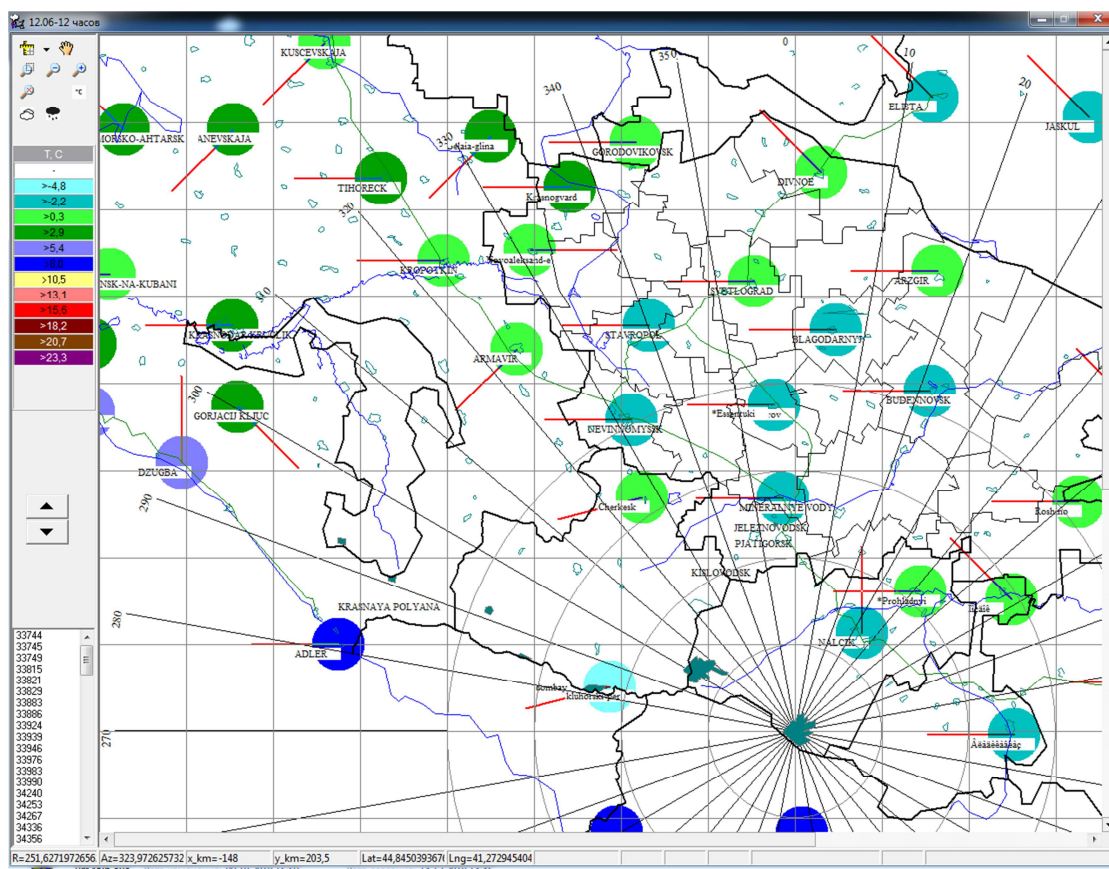


Рисунок 16 - Пример карты с данными о температуре и направлении ветра на метеостанциях.

Цветовая шкала автоматически формируется в зависимости от максимальных и минимальных значений температуры, давления, влажности и балла облачности, где кружками обозначены места расположения на карте метеостанций (рис.17). На основании этих данных можно в оперативном режиме отслеживать метеобстановку на прилегающей к ЗТ территории.

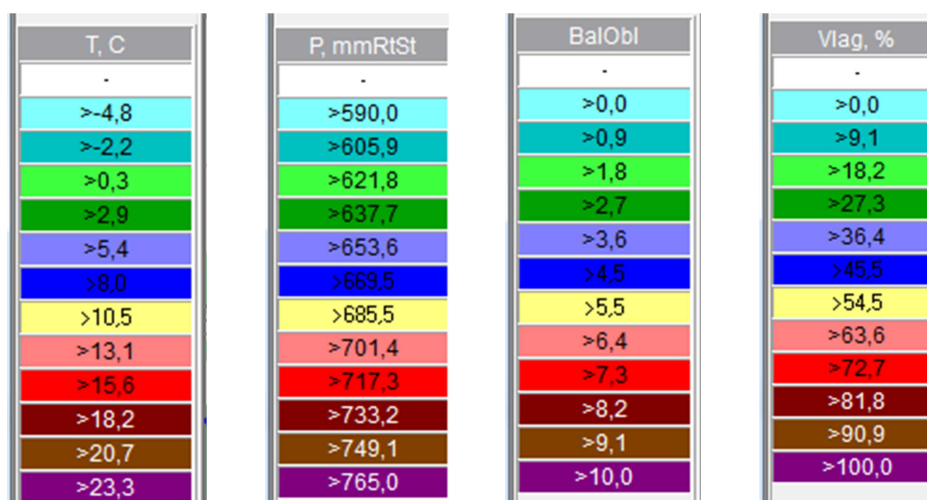


Рисунок 17 – Пример автоматически сформированных градаций температуры, давления, балла облачности и влажности.

– При появлении отражаемости в области радиолокационного обзора программа методом автоматической идентификации конвективных ячеек фиксирует и ведет временной ход параметров каждой КЯ, нумеруя их с запада на восток, с юга на север в хронологическом порядке их зарождения (рис. 18). При этом определяет категорию, направление и скорость перемещения объекта воздействия.

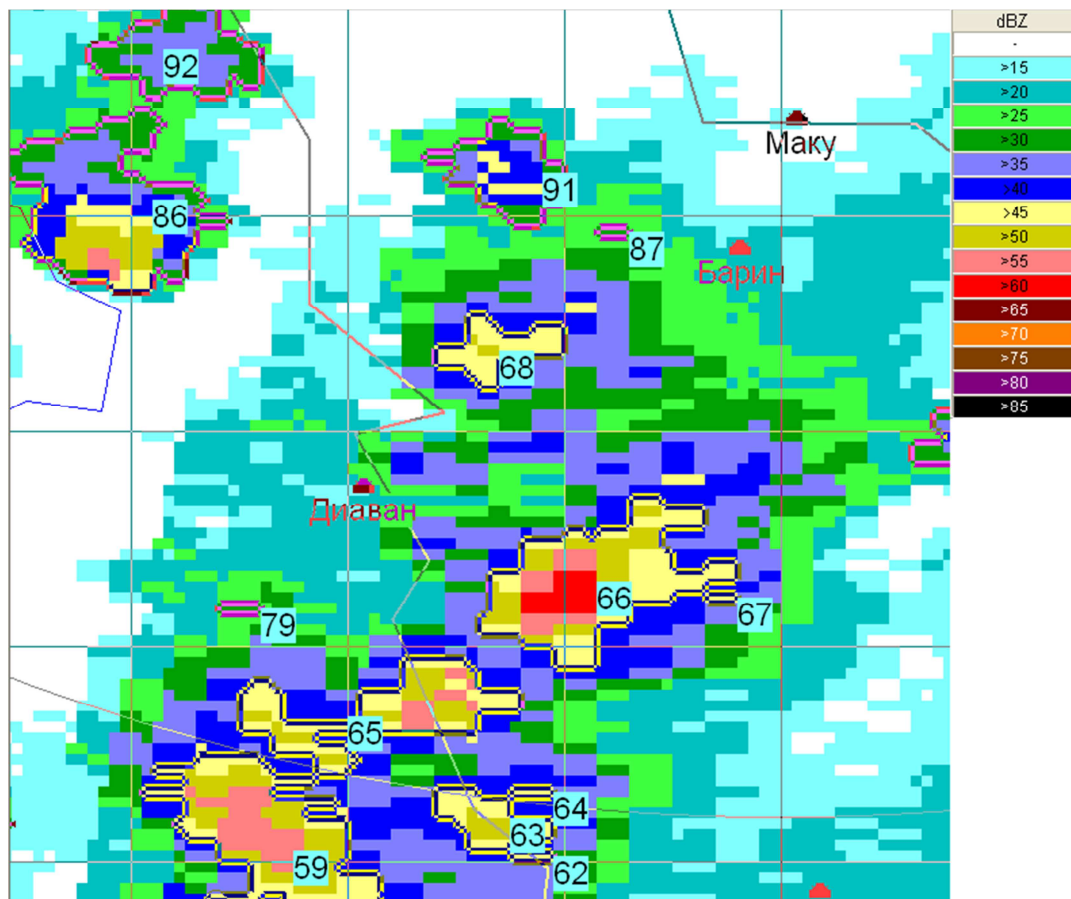


Рисунок 18 – Выделение мощных конвективных ячеек с периметром ячейки более 10 км.

По данным RadMet о температуре, давлении и влажности можно спрогнозировать тенденцию развития или диссипации КЯ, а также направление и скорость ее перемещения. Особенно это актуально для ОВ II категории, тенденция развития у которых играет ключевую роль при принятии решения об активном воздействии.

– На следующем этапе в автоматическом режиме определяется навес радиоэха. Навесом радиоэха называют область, нависающую над областью слабого радиоэха и расположенную на правом или левом наветренном фланге КЯ. Засев ОВ любой категории осуществляется в областях нависающего радиоэха, где проходит формирование условий зарождения града. В существующей системе навес радиоэха, его высота и протяженность определяется путем анализа серии вертикальных сечений в разных направлениях для каждой КЯ. Все эти операции отнимают значительное время и требуют определенного опыта, что не может не сказаться на оперативности и

эффективности работы по активному воздействию на градовые процессы.

Автоматическая идентификация навеса радиозеха базируется на методе автоматической идентификации КЯ, за навес радиозеха в автоматически локализованных конвективных ячейках принимают проекцию области на карте максимальной отражаемости, где элементарная ячейка с максимальными значениями отражаемости в столбе располагается на высоте более 5 км при отражаемости менее 20 dBZ.

Также предложено применение комплекса разработанных методов для оптимизации радиолокационной сети. На сегодняшний день радиолокационная сеть России включает 10 эксплуатируемых единиц некогерентных метеорологических радиолокаторов типа МРЛ-5; 36 единиц ДМРЛ-С отечественного производства, введенных в оперативный режим работы, 1 ДМРЛ-С, работающий в тестовом режиме (не прошедший процедуру метеорологической адаптации) и 3 импортных ДМРЛ (Методическое письмо ГГО, 2021). В целом, радиолокационная сеть в ближайшие годы будет полностью модернизирована, и устаревшие МРЛ-5 будут постепенно заменены.

С 2004 г. радиолокаторы Росгидромета передают данные наблюдений по ведомственной автоматизированной системе передачи данных (АСПД) в метеорологическом коде FM-94 BUFR (Рис.19), что позволяет строить объединенные радиолокационные карты с разрешением 4x4 км.

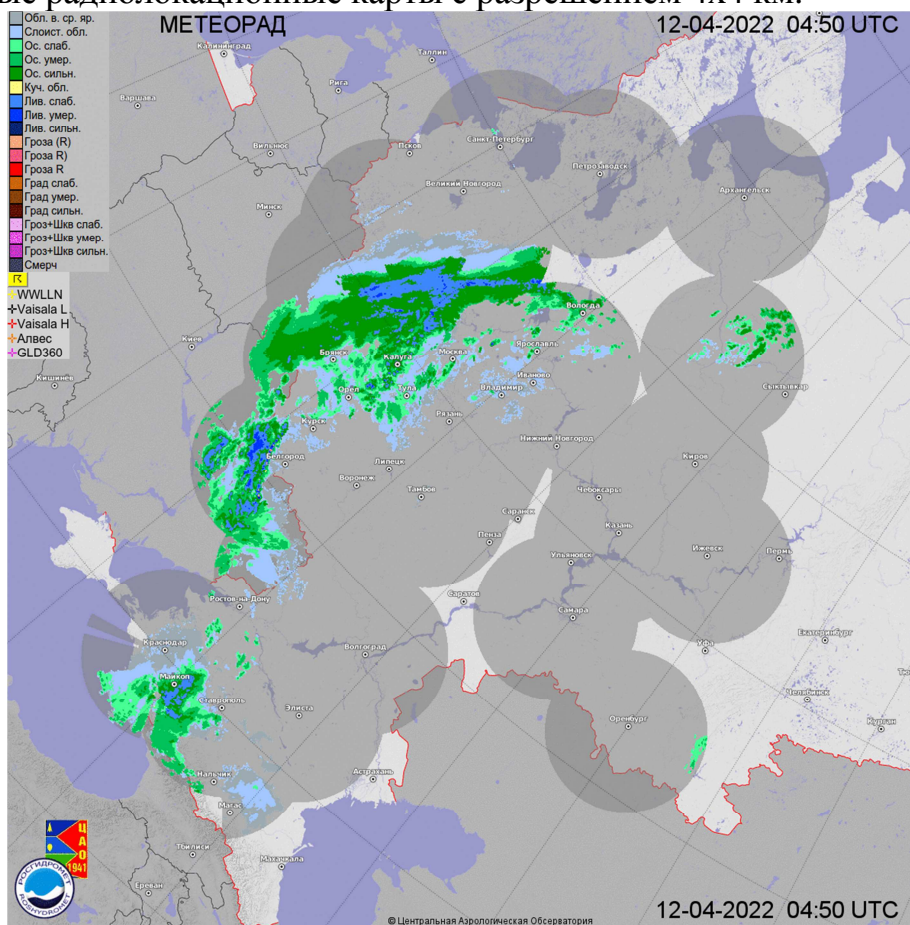


Рисунок 19 – Пример сопряженной метеокарты радиолокационной сети.

Активно развивающаяся радиолокационная сеть штормоповещения России нуждается в модернизации методов обработки информации. Предлагаемый нами алгоритм оптимизации сети штормоповещения включает в себя:

1. Объектно-ориентированный подход к отображению метеорологических карт.
2. Автокалибровку всех МРЛ сети по эталонному МРЛ;
3. Автоматическую фильтрацию аномального радиоэха;

Метеорологический код FM-94 BUFR и в целом любой вторично обработанный продукт автоматизированных сетей МРЛ представляет собой матрицу данных определенного разрешения, 4x4, 1x1 или 0.5x0.5 км. Объектно ориентированный подход подразумевает переход от матричного представления данных к объектному.

Используя метод автоматической идентификации конвективных ячеек, можно автоматически локализовать конвективные ячейки (КЯ). Далее, переводя координаты точек, входящих в локальную КЯ, из декартовых в географические, передавать в АСПД не матрицы областей зондирования атмосферы в радиусе обзора МРЛ, а координаты и значения отражаемостей точек, непосредственно передаваемых КЯ.

Принцип радиолокации, основанный на прямолинейном распространении электромагнитного излучения с постоянной скоростью, как известно, нарушается вследствие изменения скорости и направления, связанного с неоднородностью вертикальных и горизонтальных профилей коэффициента преломления воздуха, который в свою очередь зависит от вертикальных и горизонтальных профилей плотности, температуры и влажности воздуха по пути распространения радиоволн. Неоднородность вертикального профиля коэффициента преломления приводит к искривлению радиолуча по вертикали, а неоднородности по горизонтали (воздушные линзы) к искривлению радиолуча поперек направлению распространения. Эти искривления радиолуча, называемые рефракцией, наблюдаются повседневно.

В случае применения доплеровских радиолокаторов эта проблема решается путем селекции радиоэха неподвижных целей, создающих радиоэхо с нулевым или близким к нулю доплеровским сдвигом. К сожалению, данный алгоритм не всегда срабатывает. Действия ветра создают колебания объектов, попадающих в радиолуч (например, качание веток деревьев и шевеление их листы) в результате чего алгоритм дает сбой.

А при использовании некогерентных МРЛ задача фильтрации аномального радиоэха еще более осложняется. В АСУ-МРЛ реализован автоматический метод фильтрации аномального радиоэха путем подавления сигналов ниже некоторых углов возвышения по трем ступеням фильтрации: мягкая, средняя, жесткая. «Мягкая», отсекающая приземное радиоэхо в слое $H_{\text{МРЛ}} + 1$ км при условии, что выше этого в слое облакообразования нет радиоэха с $Z > 5$ dBZ; «Средняя», отсекающая приземное радиоэхо при условии, что при угле обзора выше 1 градуса нет радиоэха с $Z > 5$ dBZ. Эту фильтрацию можно ужесточить при повышенной рефракции, установив угол 2

или 3 градуса; «Жесткая», отсекающая приземное радиоэхо, у которого значения Z максимальны у поверхности земли и быстро уменьшаются с высотой. Эта фильтрация может применяться в условиях формирования атмосферных волноводов с суперрефракцией. Данный метод ведет к потере данных, зачастую значительных, и требует ручной коррекции ступеней фильтрации. Более действенный полуавтоматический метод, который включает в себя создание базы данных с локализованными в ручном режиме областями аномального радиоэха с последующим учетом этих данных при вычитании файлов от местных предметов. В то же время при применении метода автоматической идентификации КЯ автоматизированная система радиоэхо местных предметов при аномальной рефракции воспринимает как конвективную ячейку. В случае если автоматизированная система в утренние и вечерние часы фиксирует локальные псевдо КЯ с высокими значениями отражаемости при низких значениях верхней границы, это считается аномальным радиоэхом, и такие КЯ вычитаются.

Сеть МРЛ России интенсивно обновляется, морально и физически устаревшие МРЛ-5 заменяются на ДМРЛ-С, которые работают достаточно стабильно, но со временем оборудование может устаревать, приемные устройства теряют чувствительность. Поэтому метод автокалибровки сетевых радиолокаторов является крайне актуальной задачей.

Суть метода заключается в калибровке сети по эталонному МРЛ, проверенному и откалиброванному по методу стандартной мишени. Так как калибровка по мишени требует много времени и организационно-технически сложна: нужны мишень, оболочка, водород, леска, лебедка, калибровку нужно проводить рано утром в безветренную погоду – без осадков, чтобы ветер и дождь не мешали поднять мишень на нужную высоту (около 1 км). Прокалибровать один МРЛ, а остальные сравнить по радиоэху быстрее и не менее эффективно. Далее производится автоматическое сравнение характеристик облаков, находящихся на равном удалении от двух МРЛ. Для этого, используя метод автоматической идентификации КЯ, выделяются КЯ, находящиеся на равном удалении от двух МРЛ. Затем, используя метод трассировки луча, в основе которого лежит идея подсчета количества пересечений горизонтального луча, исходящего из центральной точки КЯ со сторонами области равноудаленной от двух МРЛ не более, чем на 5 км и дальнейшего сравнения характеристик КЯ, наблюдаемой от равноудаленных МРЛ, с последующей корректировкой данных поверяемого МРЛ.

В рамках данной работы предложен комплекс мер, способных повысить достоверность и надежность работы ДМРЛ-С. Большая часть рассматриваемых в работе методов и алгоритмов реализована в разработанном программном комплексе обработки метеорологической информации для статистических исследований грозоградовых процессов.

Для повышения эффективности ПГЗ необходимо внедрение АПК, включающего автоматизированную обработку радиолокационной и наземной информации от метеостанций и постов.

Основные результаты диссертации

На основе комплекса радиолокационных, грозопеленгационных и наземных исследований облаков и осадков получены следующие результаты:

1. Разработана методика и программа для ЭВМ, позволяющая автоматизировать процесс идентификации навеса радиоэха градовых и градоопасных облаков, а также локализации конвективных ячеек (КЯ), измерения их характеристик, построения графиков временного хода, определения тенденции их развития, направления и скорости перемещения. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N2017618059 от 21.07.2017 г. «Программа автоматической идентификации конвективных ячеек» и патент России № 2395819. Автоматизированная радиолокационная система штормоповещения и активных воздействий на облака. Бюллетень № 21, 2010 г.

Разработанная методика существенно отличается от существующих, и позволяет автоматизировать систему наблюдения, воздействия и исследования грозоградовых процессов. При использовании методики представляется возможным исследовать отдельные КЯ, определять стадию и тенденцию их развития.

2. Выполнен анализ качества радиолокационной информации на основе метода калибровки МРЛ по эталонному локатору и метода автоматической фильтрации аномального радиоэха по комплексным данным. Для этой цели разработана методика автоматической калибровки и программа ее реализации для ЭВМ. На методику подана заявка на выдачу патента. Программа ЭВМ зарегистрирована: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371, 07.11.2017 г.

Выполненный анализ показал, что контроль качества радиолокационной информации с использованием данной методики повышает оперативность и экономический эффект.

3. Используя разработанные технологии и программное обеспечение, выполнены исследования градовой активности конвективных облаков.

В отличие от ранее используемых методов контроля градовой активности, исследования выполнены на основе нового метода автоматической идентификации КЯ. Был произведен математико-статистический анализ характеристик всех КЯ, зафиксированных на исследуемой территории за многолетний период.

3.1. На основе применения разработанного программно-технического комплекса проведена статистическая обработка и анализ огромного массива данных радиолокационных наблюдений облаков и осадков Северного Кавказа и Крыма в период 2002 – 2019 гг. и получены следующие результаты:

3.2. Впервые на обширном экспериментальном материале получены детальные статистические данные о повторяемости КЯ с ливневыми и градовыми осадками различной интенсивности, их региональные, многолетние, годовые и суточные ходы.

3.3. Детально изучены многолетние, годовые и суточные ходы градоопасности двух регионов как в отдельные годы, так и во все годы наблюдений. Установлены наиболее градоопасные периоды года и суток, выявлены региональные особенности в повторяемости КЯ градовых процессов разной интенсивности и соотношения количества КЯ со слабым, умеренным и интенсивным градом.

3.4. Получены статистические данные о зависимости частоты пространственных точек с градовой, грозовой и ливневой опасностью от высоты, характеризующие вероятность встречи летательных аппаратов с крупным, средним, слабым градом и грозowymi разрядами.

3.5. Построены карты явлений погоды с указанием векторов направления, скорости перемещения КЯ и ведущего потока, а также методика краткосрочного прогноза местоположения явлений погоды, основанная на анализе объемных файлов радиолокационного обзора.

3.6. Выведены закономерности суточного хода градовой активности в виде степенного аналитического выражения.

4. Выполнен статистический анализ молниевой активности с помощью комплекса разработанных автором программ для ЭВМ [8-11] в зависимости от рельефа местности по данным грозопеленгационной сети Северного Кавказа.

В отличие от ранее выполненных работ исследование грозовой активности и параметров молний выполнено на основе деления исследуемой территории на элементарные ячейки с учетом высоты подстилающей поверхности над уровнем моря.

Показана высокая эффективность исследования грозоградовой опасности на основе сопряжения грозопеленгационной и радиолокационной информации.

Проведены детальные исследования грозовой активности на территории Северного Кавказа, выявлены наиболее грозо- градоопасные районы и показана зависимость грозовой активности от высоты местности. Получен временной ход частоты внутриоблачных грозowych разрядов и разрядов «облако-земля», а также токов разрядов положительной и отрицательной полярности в зависимости от стадии и тенденции их развития.

5. Получены корреляционные взаимосвязи между данными МРЛ и данными наземной сети метеостанций. Проведены сравнительные исследования наземных и радиолокационных данных о количестве осадков. Синтезированы карты, позволяющие оценить погрешности распределения осадков по площадям.

Для контроля метеообстановки на защищаемых территориях предлагается дополнительно использовать информацию метеостанций и постов, выкладываемых гидрометцентрами на сайт Росгидромета, автоматически скачивая и нанося метеорологическую информацию на радиолокационную карту. В основе метода лежит идея сопоставления радиолокационной

информации и данных сети метеостанций и постов.

Разработаны и внедрены программные комплексы для сравнения радиолокационной и наземной информации метеостанций и автоматического распознавания типа облаков по данным сети МРЛ.

Предложен и запатентован новый тип осадкомера (Патент России № 2694274): плювиограф кровельного типа, позволяющий уменьшить погрешность измерения количества и интенсивности осадков и провести более точное сравнение радиолокационных и наземных данных.

6. Выполнено сопоставление многолетних статистических данных о грозовой и градовой активности исследуемой территории, что позволило формировать целостность временных рядов исследуемых данных для определения взаимосвязи градовой и грозовой активности.

Показано, что предложенные методы сопряжения и совместной обработки радиолокационных, грозопеленгационных и наземных данных обеспечивают повышение информативности метеорологических наблюдений, повышение точности распознавания явлений погоды и измерения осадков.

7. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологии противоградовой защиты и штормооповещения.

Некоторые разработанные методы, алгоритмы и программно-технические средства автоматизированной идентификации КЯ используются в практике противоградовой защиты, штормооповещения и метеообеспечения авиации. Их применение обеспечивает повышение эффективности противоградовой защиты, а также увеличивает оперативность радиолокационного исследования облаков и создание информационного банка данных об эволюции КЯ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикация в изданиях из баз SCOPUS и Web of Science:

1. **Zharashuev M.V.** Tekueva M.T. Statistical analysis of the lightning type ground-to-cloud in the North Caucasus and the Stavropol territory. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nalchik, 2019.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК МОН РФ:

2. **Жарашуев М.В.** Статистический анализ градовой активности Крыма и Ставропольского края // Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 7. 2012 – С. 37-44.

Zharashuev M. V. Statistical analysis of hail activity in Stavropol territory and Crimea // Russian Meteorology and Hydrology, № 7. 2012. P 455-460.

3. **Жарашуев М.В.,** Гергоков А.Х. Методика автоматической идентификации площадок засева градовых облаков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2015, № 3. – С. 25-31.

4. **Жарашуев М.В.,** Макитов В.С., Карамазов А.Х., Кулиев Д.Д. Метод калибровки МРЛ сети штормоповещения // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Выпуск № 586. 2017. - С. 164-174.

5. **Жарашуев М.В.,** Гергоков А.Х., Кагермазов А.Х., Макитов В.С., Созаева Л.Т. Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Выпуск 588. 2018. - С. 139-149.

6. Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., **Жарашуев М.В.** Прогноз паводкообразующих осадков на территории северного Кавказа с использованием глобальной модели атмосферы // Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 6. 2019 – С. 80-86.

7. **Жарашуев М.В.** Статистический анализ повторяемости молниевых разрядов типа «облако – облако» на территории Северокавказских республик и Ставропольского края // Труды ГГО. Выпуск 595.- 2019. - С. 145-152.

8. **Жарашуев М.В.** Цикличность градовой активности на Северном Кавказе // Труды ГГО. Выпуск 598.- 2020. - С. 197-203.

9. **Жарашуев М.В.** Статистический анализ молниевой активности на территории Северного Кавказа // Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 6. 2021 – С. 112-115.

10. **Жарашуев М.В.** Сопоставление статистических данных грозовой и градовой активности на территории Северного Кавказа // Труды ГГО. Выпуск 603.- 2021. - С. 145-154.

11. **Жарашуев М.В.** Методика автоматизированного статистического анализа разрядов «облако-земля» для территории Северного Кавказа // Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 4. 2022 – С.111-116.

12. **Жарашуев М.В.** Комплексное применение разработанных методов для оптимизации порядка радиолокационных наблюдений при противоградовых работах // Труды ГГО. Выпуск 605.- 2022. - С. 164-172.

13. **Жарашуев М.В.** Оптимизация работы радиолокационной сети Российской федерации // Труды ГГО. Выпуск 606.- 2022. - С. 145-151.

Патенты и регистрации программ:

14. Патент России № 2395819. Автоматизированная радиолокационная система штормооповещения и активных воздействий на облака. Бюллетень № 21, 2010 / Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Жарашуев М В. и др.

15. Патент России № 2694274. Плювиограф для измерения атмосферных осадков / Бюллетень № 20, 2019 / Байсиев Х.-М.Х., Жарашуев М В.

16. Жарашуев М.В. Программа автоматической идентификации конвективных ячеек // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618059, 21.07.2017 г.

17. Жарашуев М.В. Программа автоматической калибровки МРЛ сети штормооповещения // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371, 07.11.2017.

18. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Программа автоматического сравнения радиолокационных и наземных данных // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616642, 05.06.2018 г.

19. Жарашуев М.В. Программа автоматического формирования банка данных сети метеостанций // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661469, 07.09.2018 г.

20. Жарашуев М.В. Программа расчета траектории противоградовых ракет для целей искусственного увеличения осадков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617756, 20.06.2019г.

21. Жарашуев М.В. Программа статистической обработки грозопеленгационной информации о молниях типа «земля-облако» на территории Северного Кавказа и Ставропольского края // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617757, 20.06.2019г.

22. Жарашуев М.В. Программа автоматического статистического анализа мощных гроз на территории Северного Кавказа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020663445, 27.10.2020г.

23. Жарашуев М.В. Программа автоматической обработки информации от грозопеленгаторов LS8000 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020663442, 27.10.2020 г.

24. Жарашуев М.В. Программа расчета характеристик мощных молниевых разрядов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021663325, 16.08.2021 г.

Публикации в других изданиях:

1. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Jarashuev M.V. etc. New means of hail suppression. // Proc. 9th WMO Int. Sci. Conf. on Weather Modification. – Antalya, 2006. – P.155-163

2. **Жарашуев М.В.**, Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М. Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 3. 2010 – С. 36-45.

Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., **Jarashuev M.V.** Automated radar identification, measurement of parameters, and classification of convective cells for hail protection and storm warning // Russian Meteorology and Hydrology, №3. 2010. P 182-189.

3. **Жарашуев М.В.** Статистический анализ радиолокационных характеристик мощных конвективных ячеек // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2010. – С. 58 - 65.

4. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., **Жарашуев М.В.** Автоматизированная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2010, № 1. – С. 109-113.

5. Абшаев М.Т., **Жарашуев М.В.**, Абшаев А.М. Метод фильтрации аномального радиоэха// Инженерный вестник Дона. 2019. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6230.

6. **Жарашуев М.В.** Измерение осадков с увеличенной площадью водосборника // Москва, Русский инженер, № 03(64). 2019. - С. 45-48.

7. **Жарашуев М.В.**, Терекулов З.М. Исследование суточного хода разрядов типа «облако-земля» на территории Северного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. Т.14 №1. 2020- С.70-74.

8. **Жарашуев М.В.**, Терекулов З.М. Методика статистического анализа грозовой активности на территории Северного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. Т. 14 №3. 2020- С.70-74.

9. **Жарашуев М.В.**, Терекулов З.М., Акшаяков З.Т., Баттаев А.Ш. Разработка способа мониторинга паводков и селей в труднодоступных районах // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. Т. 14 №3. 2021- С.68-73.

10. Акшаяков З.Т., Баттаев А.Ш., Терекулов З.М., **Жарашуев М.В.**, Сбор и обновление параметров паводков и селей в труднодоступных районах //

Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. Т. 15 №3. 2021- С.55-63.

11. Абшаев М.Т., Жарашуев М.В. Алгоритмы автоматизированного распознавания конвективных ячеек и получение временного хода их параметров.// Тезисы научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. – Нальчик, 2007. – С. 79-80.

12. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» // Тезисы научно-практической конференции посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. – Нальчик, 2007. – С. 72-76.

13. Абшаев А.М. Жарашуев М.В. Автоматизированная идентификация конвективных ячеек в кучево-дождевой облачности // Материалы IX конференции молодых ученых КБ НЦ РАН. – Нальчик, 2008. – С. 47-52.

14. Абшаев А.М., Жарашуев М.В. Оптимизация подготовки и передачи радиолокационной информации в сеть штормооповещения и метеобеспечения авиации // Материалы IX конференции молодых ученых КБ НЦ РАН. – Нальчик, 2008. – С. 52 -57.

15. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Жарашуев М.В. Автоматизированная идентификация, измерение параметров конвективных ячеек для целей штормооповещения и защиты от града // Тезисы докладов научной конференции институтов Росгидромета, посвященной 50-летию Отдела физики облаков ГГО им. А.И. Воейкова, «Теоретические и экспериментальные исследования облаков». – СПб., 2008. – С. 42-44.

16. Жарашуев М.В. Автоматическая статистическая оценка суточного хода числа градовых ячеек на Северном Кавказе // Материалы X конференции молодых ученых. – Нальчик, 2009. - С. 114-118.

17. Жарашуев М.В. Автоматический статистический анализ повторяемости различных типов осадков в Ставропольском крае и прилегающих республиках. // Материалы X конференции молодых ученых – Нальчик, 2009. - С. 110-114.

18. Жарашуев М.В. Изучение градовой активности ставропольского края методом автоматической идентификации конвективных ячеек // Наука и устойчивое развитие. Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Нальчик, 2010, С18-23.

19. Жарашуев М.В. Метод идентификации конвективных ячеек и его применение для исследования градовой активности крымской области. // Наука и устойчивое развитие. Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Нальчик, 2010, С23-27.

20. Жарашуев М.В. Метод идентификации конвективных ячеек и его применение для исследования климатических особенностей Крыма // Тезисы на всероссийской конференции МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ, посвященной 50-летию юбилею НПО «Тайфун», Обнинск 2010, С57-61

21. Жарашуев М.В. Исследование опасных явлений погоды, Ставропольского края методом автоматической идентификации конвективных ячеек // Тезисы на всероссийской конференции молодых специалистов, посвященной 50-летию юбилею НПО «Тайфун», Обнинск 2010, С61-65

22. Жарашуев М.В., Абшаев М.Т. Алгоритмы автоматизированного распознавания конвективных ячеек и получения временного хода их параметров // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий, Нальчик, 2011. С. 230 - 240

23. Жарашуев М.В. Статистическое исследование градовых процессов, развивающихся в Ставропольском крае в ночное время суток. // Тезисы конференции молодых ученых Высокогорного геофизического Института, посвященной 100-летию профессора Г.К. Сулаквелидзе. Нальчик

24. Жарашуев М.В., Чубакова А.Я. Автоматическая идентификация конвективных ячеек для оптимизации радиолокационной сети штормооповещения // Материалы IV Международной научно-практической конференции преподавателей, научных работников и специалистов 25-27 апреля 2013. Воронеж. - С. 125-130.

25. Жарашуев М.В., Чубакова А.Я., Барекова М.В. Статистическое исследование градовых процессов, развивающихся на Северном Кавказе в ночное время суток // Нальчик, Труды ВГИ. Вып. 98. С. 24

26. Жарашуев М.В. Новая методика идентификации засева градовых облаков // Тезисы докладов XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Борок. 2014. - С. 14

27. Жарашуев М.В. Автоматизация идентификации площадки засева градовых облаков // Состояние и перспективы развития информационных технологий в гидрометеорологии. Информационное обеспечение морской деятельности. Обнинск 2014.

28. Жарашуев М.В. Статистические исследования градовых процессов, развивающихся в Ставропольском крае в ночное время суток // Тезисы докладов XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Борок. 2014. - С. 14

29. Жарашуев М.В. Метод автоматической идентификации областей будущего градообразования // Всероссийская открытая конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические

процессы, посвященная 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. Нальчик 2014.

30. Жарашуев М.В. Автоматизация идентификации площадок засева градовых облаков для Северного Кавказа. // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – мирового центра данных. Обнинск, 2015, Вып. 179 –С. 144-153.

31. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Влияние рефракции на сопоставление наземных и радиолокационных данных. // Материалы всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «ФНЦ «КБНЦРАН» д.т.н. профессора П.М. Иванова. 2017. С134-138

32. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Поверка радиолокационной сети по эталонному локатору // Материалы всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «ФНЦ «КБНЦРАН» д.т.н. профессора П.М. Иванова. 2017. С138-143

33. Жарашуев М.В., Циканов Х.А., Гергоков А.Х., Аппаева Ж.Ю. Программный комплекс сети метеостанций // Материалы всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «ФНЦ «КБНЦРАН» д.т.н. профессора П.М. Иванова. 2017. С143-146

34. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Макитов В.С., Кулиев Д.Д. Методика уменьшения погрешности при сопоставлении наземных и радиолокационных данных // Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 2. Нальчик, 2017. – С. 336-344.

35. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Макитов В.С., Кулиев Д.Д. Метод автокалибровки радиолокационной сети // Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 2. Нальчик, 2017. – С. 344-353.

36. Жарашуев М.В., Циканов Х.А., Гергоков А.Х., Аппаева Ж.Ю. Программный комплекс сопряжения радиолокационных и наземных данных // Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. Нальчик, 2017. – С. 162-169.

37. Жарашуев М.В., Макитов В.С., Инюхин В.С. Радиолокационные исследования формирования и развития отдельных конвективных ячеек в комплексах многоячейковых градовых процессов // Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. Нальчик, 2017.–С. 180-187.

38. Жарашуев М.В., Акшаяков З.Т. Методика районирования и оповещения о камнеопасных участках в КБР // Доклады I Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». г. Владикавказ, 2019 г.

39. Жарашуев М.В. Исследования результатов измерения количества осадков различными типами осадкомеров// Материалы VI Международной научно-практической конференции памяти Б.Х. Жерукова. Часть 3. г. Нальчик, 2019 г.

40. Жарашуев М.В., Текуева М.Т. Статистический анализ молний типа «облако-земля» на территории Северного Кавказа и Ставропольского края. // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нальчик, 2019 – С. 173-176.

41. Казакова С.Т., Кулиев Д.Д., Жарашуев М.В. Сезонные вариации суточного хода напряженности электрического поля атмосферы Земли // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нальчик, 2019 – С. 16-18.

42. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Казакова С.Т., Муратов И.А., Будаев А.С., Жарашуев М.В. Статистические параметры молниевых разрядов на юге европейской части России // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нальчик, 2019 – С. 143-146.

Отзыв на автореферат, в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет ДС 24.2.365.02, Ученому секретарю.

В отзыве необходимо указать полностью ФИО, учёную степень и учёное звание, должность и место работы, полное наименование учреждения и почтовый адрес, телефон, электронную почту.