

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА РОССИИ ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
(Росгидромет)

**ФГБУ «ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

*На правах рукописи*

**УДК 551.509.616**

**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.

**Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

**Научный консультант:**

**доктор физико-математических наук,  
доцент А.М. Абшаев**

**г. Санкт-Петербург – 2026 г.**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	19
1.1. Состояние обработки радиолокационной информации.....	19
1.2. Возможности существующих радиолокационных сетей.....	29
1.3. Радиолокационная сеть России.....	39
1.4. Ячейковая структура градовых процессов.....	50
1.5. Анализ состояния обработки данных грозопеленгационной сети на Северном Кавказе.....	63
Выводы.....	67
Глава 2. МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ И АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	68
2.1. Локализация облаков и конвективных ячеек .....	68
2.2. Метод и алгоритмы идентификации облаков.....	70
2.3. Метод, алгоритмы и программа идентификации навеса радиоэха градовых облаков.....	86
2.4. Метод, алгоритмы и программа автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному локатору.....	91
2.5. Методы и алгоритм фильтрации аномальной рефракции.....	96
2.6. Метод определения гроз и градоопасности территории в зависимости от рельефа местности.....	106
2.7. Метод автоматического сравнения данных МРЛ и метеопостов сети Росгидромета о суммарных осадках.....	112
Выводы.....	117
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ПОВЫШЕНИЮ ИНФОРМАТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ .....	119

3.1. Проверка метода автоматической идентификации облаков.....	119
3.2. Оценка степени градоопасности облака по данным МРЛ.....	122
3.3. Проверка метода идентификации навеса радиоэха градовых облаков.....	126
3.4. Проверка метода автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному локатору.....	132
3.5. Проверка метода автокалибровки радиолокационной сети по данным метеостанций и постов .....	134
Выводы.....	155
<b>Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗО-ГРАДОВОЙ АКТИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ.....</b>	<b>158</b>
4.1. Исследование повторяемости и параметров градовых конвективных ячеек.....	158
4.2. Исследование распределения по высоте неблагоприятных для полета авиации облачных условий.....	178
4.3. Повышение информативности исследования грозоградовых процессов .....	184
4.4. Статистический анализ характеристик молниевых разрядов на территории Северного Кавказа.....	193
4.5. Исследование мощных грозовых разрядов на территории Северного Кавказа.....	209
Выводы.....	215
<b>Глава 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ И ШТОРМООПОВЕЩЕНИИ.....</b>	<b>218</b>
5.1. Перспективы комплексного применения радиолокационной, грозопеленгационной, спутниковой и наземной информации метеостанций и постов . .....	218
5.2. Перспективы применения спутниковой информации.....	219
5.3. Развитие и модернизация наземной информации об осадках для калибровки данных МРЛ.....	222
5.4. Оптимизация радиолокационных наблюдений при проведения противоградовых работ.....	241
5.5. Перспективы оптимизации работы радиолокационной сети.....	246
Выводы.....	252
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>253</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>257</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире большое внимание уделяется развитию методов и средств метеорологических наблюдений, созданию разветвленных систем геофизического мониторинга, оценки состояния и прогноза погоды, основанные 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 системах оповещения о паводках ливневого происхождения. Прогресс в этой области способствует прогрессу и в области изучения радиоволн, радиосвязи, передачи и обработки информации [5,147,148,196].

Высокая информативность метеорологических радио МРЛ (МРЛ) для мониторинга погоды, обнаружения и оповещения об опасных явлениях погоды привела к созданию государственных радиолокационных метеорологических сетей во многих странах. Радиолокационная сеть России, имевшая 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 [2,3,126,127].

В последние годы энергично развиваются грозопеленгационные, спутниковые и наземные сети метеорологических наблюдений. При этом крайне актуальной становится задача сопряжения данных радиолокационной,

грозопеленгационной и спутниковых наблюдений с данными наземной сети метеостанций. 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 [6,8,10,16].

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 [19,21,93,110,114].

Отечественные и зарубежные работы по радиолокационной метеорологии базируются на большом объеме теоретических исследований и расчетов поперечников обратного рассеяния и ослабления облачными образованиями и осадками в виде дождя и града для широкого диапазона длин волн [302,304-307]. Такие исследования были выполнены в Англии Райдом еще до и во время второй мировой войны, т.е. до 1945г. [278,305].

Первые теоретические работы, объясняющие физическую природу быстрых флуктуаций интенсивности рассеянного поля, также относятся к середине 40-х годов прошлого столетия [172,203,278,289]. Эти работы послужили основой для дальнейшего развития исследований в этом направлении и заложили основы нового направления в радиолокационной метеорологии, а именно статистической радиолокационной метеорологии, включая доплеровскую радиолокационную метеорологию [44,237,243].

В настоящее время резко расширился круг задач, который пытаются

решить при помощи радиолокации. Так, помимо традиционных направлений, связанных с изучением процессов, протекающих в различного типа и масштаба облачных образованиях и системах, появилось направление, связанное с изучением «тонкой структуры» радиоэха и безоблачной атмосферы, недоступных для исследования при помощи иных средств и методов.

Особое место занимают радиолокационные исследования динамических процессов, протекающих на различных высотах в свободной атмосфере, включая не только тропосферу, но и стратосферу, и нижние слои мезосферы [47,145,160,193].

Такое расширение направлений, по которым развивается современная радиолокационная метеорология, стало возможным за счет резкого увеличения потенциала радиолокационных станций, их установки не только на Земле, но и на самолетах, спутниках, расширения диапазона длин волн, в котором могут работать метеорологические радиолокаторы (от  $3 \cdot 10^{-3}$  до 6 метров) [209]. Были созданы доплеровские и поляризационные радары [49,58,64,104]. Широкое применение получили активно-пассивные системы радиолокации, одновременно работающие в широком диапазоне длин волн. Особенное значение приобрело введение в состав активно-пассивных радиолокационных комплексов и мощных оптических лидаров, открывающих новые возможности для изучения процессов, протекающих в облачных системах на различных стадиях их развития и приводящих к образованию и выпадению различных типов осадков (дождя, крупы, града и снега).

Получаемый при помощи радиолокаторов большой объем информации требует для ее обработки применения высокопроизводительной вычислительной техники и современного программного обеспечения. Особенность применения вычислительной техники в радиолокационной метеорологии состоит в том, что первичная обработка и возможность её экспресс анализа, особенно в оперативной работе, должны осуществляться

непосредственно в информационной радиолокационной системе, причем в реальном масштабе времени [4,9,43,55,103].

В процессе своего бурного развития радиолокационная метеорология подошла к этапу, характеризующемуся тем, что она может и должна не только выполнять «наблюдательные» функции, но и превращаться в настоящую измерительную систему. Измерения того или иного метеорологического параметра осуществляются с указанием достоверности и точности его измерения. И в конечном итоге полученные результаты предоставляются в величинах, которыми обычно пользуются метеорологи или специалисты, занимающиеся изучением строения и динамических процессов, протекающих в атмосфере.

Измерительные функции радаров существенно зависят от угла места антенны. Измерения, выполненные в режиме вертикального зондирования, обычно легче поддаются геофизической интерпретации по сравнению с теми данными, которые получены при наклонном зондировании [168].

Наиболее достоверная интерпретация данных радиолокационного зондирования метеообразований возможна на удалениях до нескольких километров при наличии достоверной информации о микроструктуре и строении метеообразования. Подобная информация может быть получена с использованием мультипараметрических измерений, включая многоволновые радиолокационные, радиометрические и контактные измерения.

На сегодняшний день радиолокационная сеть России состоит из множества локаторов как МРЛ-5, так и ДМРЛ-С. Согласно федеральной целевой программе до 2020 года сеть ДМРЛ планируется довести до 140 локаторов. Для эффективного функционирования радиолокационной сети исключительную важность имеет развитие методов и технических средств автоматического контроля параметров метеообъектов [68,69,91].

Все это обуславливает высокую актуальность проблемы повышения информативности 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:

- радиолокационного распознавания метеообъектов;
- калибровки каждого МРЛ и радиолокационной сети в целом;
- сопряжения данных радиолокационных, грозопеленгационных и наземных наблюдений и измерений;
- повышения адекватности и снижение погрешности измерений.
- статистического анализа радиолокационной и грозопеленгационной информации.

Взаимодополнение грозопеленгационных, радиолокационных, спутниковых данных и информации от наземных метеостанций и постов открывает новые возможности в повышении достоверности и качестве интерпретации метеорологической информации. Если раньше, ввиду отсутствия технических возможностей, радиолокационная, грозопеленгационная и наземная информации метеостанций и постов являлись независимыми источниками информации, то в последние годы в радиолокационной метеорологии широко внедряются информационные системы, в задачи которых входит объединение результатов наблюдений нескольких метеорологических радиолокаторов (МРЛ) с пересекающимися областями обзора пространства [21,46]. Все более и более в системе штормооповещения и противоградовой защите становится востребованной грозопеленгационная и наземная информация [132,239,248,250]. Несмотря на то, что попытки связать эти источники информации проводились и проводятся до сих пор, все же на сегодняшний день существует нехватка методов объединяющих, дополняющих и контролирующих достоверность предоставляемой метеорологической информации.

Все это обуславливает **высокую актуальность** исследования грозоградовых процессов с помощью метеонаблюдений, модернизации и оптимизации методов обработки метеорологической информации, повышения 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 работы** является исследование грозоградовой активности на основе комплексной обработки грозопеленгационных, радиолокационных и наземных данных для совершенствования технологии противоградовой защиты и штормооповещения.

**Объект исследования** – наземная информация метеостанций и постов, грозопеленгационные и радиолокационные данные.

**Предмет исследования** – методы обработки радиолокационной, грозопеленгационной и наземной информации о явлениях погоды, с целью повышения информативности и достоверности получаемых данных.

**Научная проблема**, решаемая в диссертации – разработка научно-методического аппарата, включающего в себя теоретическое обоснование и практические рекомендации по объединению основных видов метеорологической информации в единое целое, повышение качества и информативности данных, получаемых с помощью технических средств наблюдения за гидрометеорологическими процессами.

**Для достижения цели в диссертации поставлены и решены следующие частные задачи исследования:**

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 и 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**

– 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 и 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 штормооповещения 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- и 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 противогорадовой 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, образующихся 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 метеобеспечения (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).

**На защиту выносятся:**

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. 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.

#### **Обоснование и достоверность результатов.**

Достоверность основных результатов обеспечена корректностью постановки рассмотренных задач и методов их решения. Визуальным подтверждением эффективности методов является хорошее соответствие полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными радиолокационного зондирования облаков и данными наземных измерительными приборов.

Обоснованность предложения по повышению информативности сети штормооповещения подтверждается большой выборкой численных экспериментов, сопоставлением результатов, полученных на основе измерения различными методами.

### **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 результатов.**

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.)
- 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 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» (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 VI Международной научно-практической конференции памяти Б.Х. Жерукова (г. Нальчик, 2019).

– на IV Международной научной конференции «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды» (г. Ставрополь, 2022).

**Публикации:** По теме диссертации опубликованы 56 научные работы, получено три патента РФ и 89 свидетельств на регистрацию программы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем составляет 318 страницы машинописного текста, включая 12 таблиц, 117 рисунков, список используемой литературы из 317 наименований работ и 3 приложения на 26 странице.

## Глава 1

# АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБРАБОТКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

## 1.1 Состояние обработки радиолокационной информации

В настоящее время метеорологические радиолокаторы (МРЛ), обеспечивающие дистанционное обнаружение облаков и осадков, распознавание явлений погоды, измерение их различных параметров, направления и скорости перемещения, имеют широкое применение для целей штормооповещения, метеообеспечения авиации, модификации погоды, краткосрочных прогнозов [105].

При этом программно-техническое оснащение МРЛ непрерывно модернизируется. На заре противоградовых работ для этих целей использовались корабельные и авиационные радиолокаторы («Лоза», «Роз-1», «ПСБН» и др.), «МРЛ-1», «МРЛ-2» и в 1970-72 гг. был создан «МРЛ-5» [19]. С момента разработки и по сей день в России активно ведутся работы по созданию и модернизации методов хранения и обработки метеорологической информации.

Современный уровень развития радиолокационной и вычислительной техники, техническая революция в средствах передачи информации и накопленный научно-технический потенциал в интерпретации радиолокационной информации (алгоритмы, программы), обеспечили возможность создания метеорологических автоматизированных радиолокационных сетей и систем сбора, обработки и объединения данных многих МРЛ, которые могут выдавать единые композитные радиолокационные карты в масштабах регионов, стран и континентов, удовлетворяющие запросы широкого круга потребителей [105].

Наиболее распространенными за рубежом (США, Канада, Европа, Австралия, ЮАР и др.) системами обработки, хранения, представления и

распространения радиолокационной информации являются TITAN, WDSS-II, Rainbow, IRIS [259,272,289].

**1.1.1 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting)** разработан в 1982 г. для обработки и визуализации радиолокационных измерений одного МРЛ. В начале 1990-х годов по заказу Федерального управления авиации США NCAR TITAN был приспособлен для прогноза кучево-дождевых облаков, а в Бюро метеорологии Австралии решены вопросы введения других источников информации [272].

Система TITAN работает в среде Linux. Отличительной особенностью системы TITAN в части обработки радиолокационных данных было то, что данные с каждого радиолокатора обрабатывались отдельно, но в последние годы система позволяет сшивать данные нескольких МРЛ в единую карту [259]. Исходная информация о радиоэхе, радиальном ветре и ширине доплеровского спектра поступает в систему в полярных координатах радиолокационных измерений (азимут, угол места антенны и расстояние по радиусу) и переводится в ней в декартовы координаты, аналогично тому, что применяется в отечественных системах АКСОПРИ, «Метеоячейка», «АСУ-МРЛ».

В современной версии TITAN с 2005 г в соответствии с Руководством по его применению усваиваются следующие виды данных [259]:

- данные МРЛ США различных типов, каждый из которых передает данные в своем формате.
- данные самолетных наблюдений в формате ASCII.
- данные с американских спутников в формате GINI.
- результаты расчетов по моделям в коде ГРИБ (по состоянию на 2005 г. читались прогнозы по моделям RUC, AVN и WAFS).
- сводки, передаваемые по ГСТ.
- информация сети грозопеленгаторов в формате ASCII.
- сводки METAR в формате ASCII.

- данные NIDS NEXRAD уровня 3 в полярных координатах.
- данные VAD (Velocity Azimuth Display) из потока NIDS.
- данные измерений с помощью осадкомеров в формате ASCII.
- мозаики радиолокационных данных WSI. Процедура сопряжения измерений разных МРЛ является довольно грубой.

**1.1.2 WDSS-II (Warning Decision Support System-Integrated Information)**, созданная в 2003-2005 гг., радикально отличается от системы TITAN. Основное отличие состоит в том, что производится обработка данных нескольких соседних МРЛ (до 5 или больше, в зависимости от лицензии) и метеорологических спутников. Переменные из полярных координат каждого МРЛ трансформируются сначала в широтно-долготную сетку с шагом  $0,01^\circ$  (около 1 км) и, поскольку данные наблюдений различных МРЛ не синхронизованы, сразу производится процедура синхронизации измерений. Для этого привлекается информация о ветре и осуществляется адвекция радиолокационных полей с тем, чтобы получить положение полей в единый момент времени. В зонах перекрытия наблюдений от разных МРЛ выполняется анализ качества сигнала с каждого МРЛ и отдается предпочтение лучшему сигналу. В результате такой обработки создается трехмерный массив синхронных радиолокационных измерений на большой территории в географических координатах, что удобно для совместного анализа с другими видами наблюдений, поступающими тоже в географических координатах (анализы и прогнозы в коде GRIB, измерения с геостационарных спутников и т.д.). В WDSS-II также применен более совершенный алгоритм контроля качества измерений, базирующийся на аппарате нейронной сети, а в ряде алгоритмов (исключение эффекта яркой полосы в районе нулевой изотермы, диагностике града) привлекаются результаты прогнозов по мезомасштабной модели. Для исключения радиоэха от неметеорологических целей (птицы, насекомые, пыль) привлекаются ИК измерения с геостационарных спутников [313,315].

В качестве входных данных для системы WDSS-II используются

практически те же виды данных, что и в системе TITAN: исходные радиолокационные измерения уровня II, анализы и прогнозы в коде GRIB, различного рода сводки, состав которых можно расширять, а также наблюдения с геостационарных спутников и сети грозопеленгаторов. Выполняя те же функции, что и система TITAN, WDSS-II позволяет проводить анализ синоптической ситуации не в масштабе зоны наблюдения одним МРЛ в декартовой системе координат как в TITAN, а в масштабе всего региона и представлять комплексированную информацию на дисплее персонального компьютера. В случае США – это вся континентальная часть страны [311].

Программное обеспечение WDSS-II ориентировано на использование операционной среды Linux и работает на обычных рабочих станциях, оснащенных многоядерными процессорами типа Intel Xeon и стандартными видеоконтроллерами. Базовая библиотека программ обработки и визуализации данных написана на языке C/C++. Использование стандартных форматов netCDF и HTM обеспечивает эффективную интеграцию с численными моделями прогноза и сетевыми технологиями распространения прогностической продукции по Интернет. Для проведения оперативных испытаний WDSS-II была включена в качестве модуля в систему SCAN. Выходная продукция WDSS-II направлялась в экспериментальном порядке в 18 бюро погоды США по системе AWIPS и получила положительные оценки прогнозистов.

Система WDSS-II превосходит по своим качествам систему TITAN:

- более качественным согласованием данных измерений отдельных МРЛ, спутниковой информации и прогностических полей мезо-метеорологических моделей высокого пространственного разрешения;
- представлением выходной продукции в виде массива синхронизированных измерений в географических координатах, а не формально стыкованных измерениях в декартовых координатах;
- использованием более совершенных алгоритмов контроля качества радиолокационных измерений и более широким использованием результатов

прогностических моделей и измерений со спутников;

– использованием общедоступного системного программного обеспечения и стандартного вычислительного оборудования персональных ЭВМ.

### 1.1.3. Система Gematronic Rainbow

Система Rainbow удовлетворяет всем требованиям для универсального применения в области управления радаром, мониторинга погоды, применяется для метеобеспечения авиации, а также для научных исследований. Позволяет обрабатывать информацию сразу нескольких радаров. Имеет независимую платформу, может работать как в Linux так и в Windows 7/10.

Имеет довольно широкий функционал, как стандартной радиолокационной информации, карт: максимальной отражаемости, горизонтальных сечений, интенсивности осадков и т.д., так и нестандартной – контурные линии, профили ветра, радиальные значения интенсивности и т.д. (рис 1.2). Производители заявляют о том, что система может в тестовом режиме выделять КЯ (рис1.1), а также интегрировать в себе информацию метеостанций, молниевых разрядов, спутника и т.д.

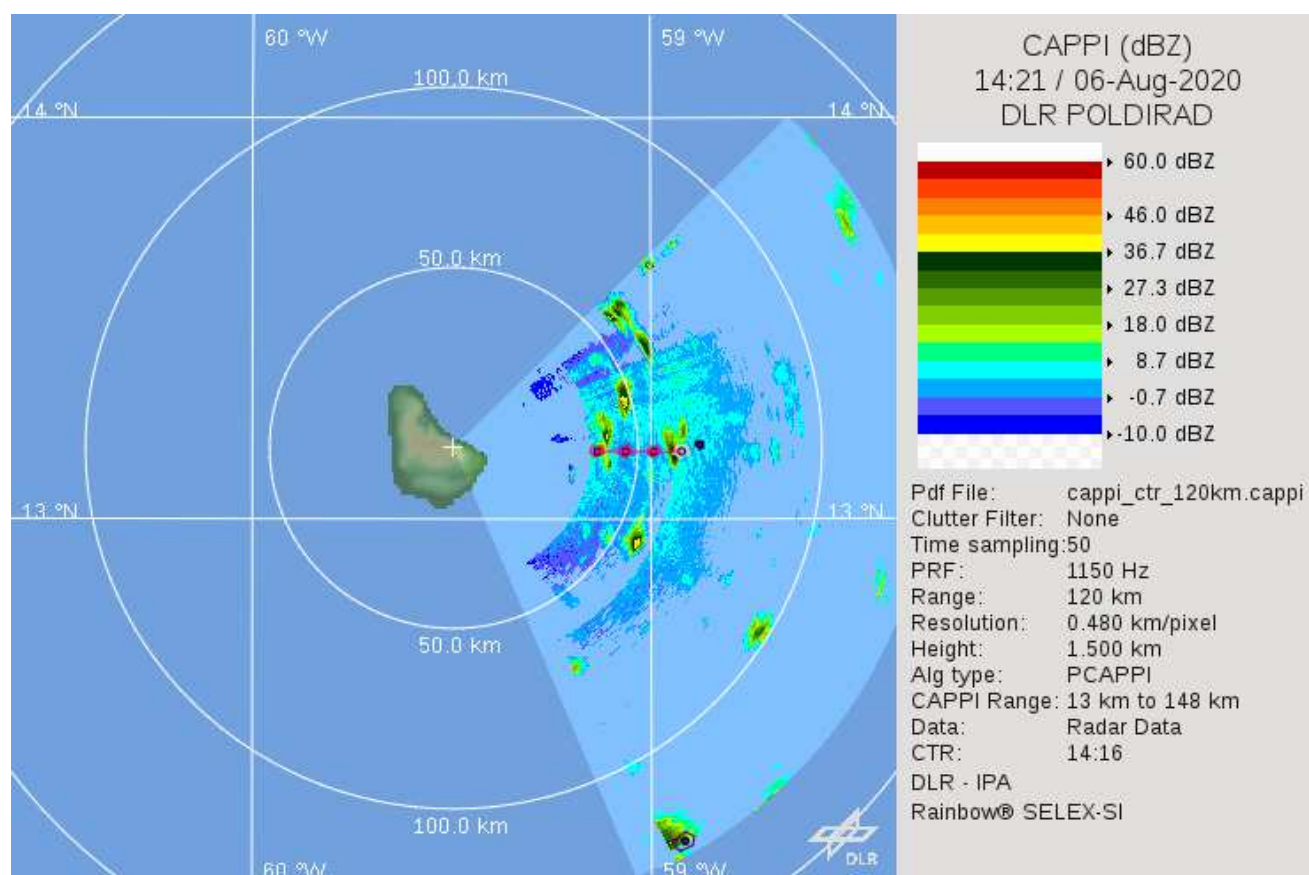


Рис. 1.1 Тестовый вариант локализации и мониторинга КЯ

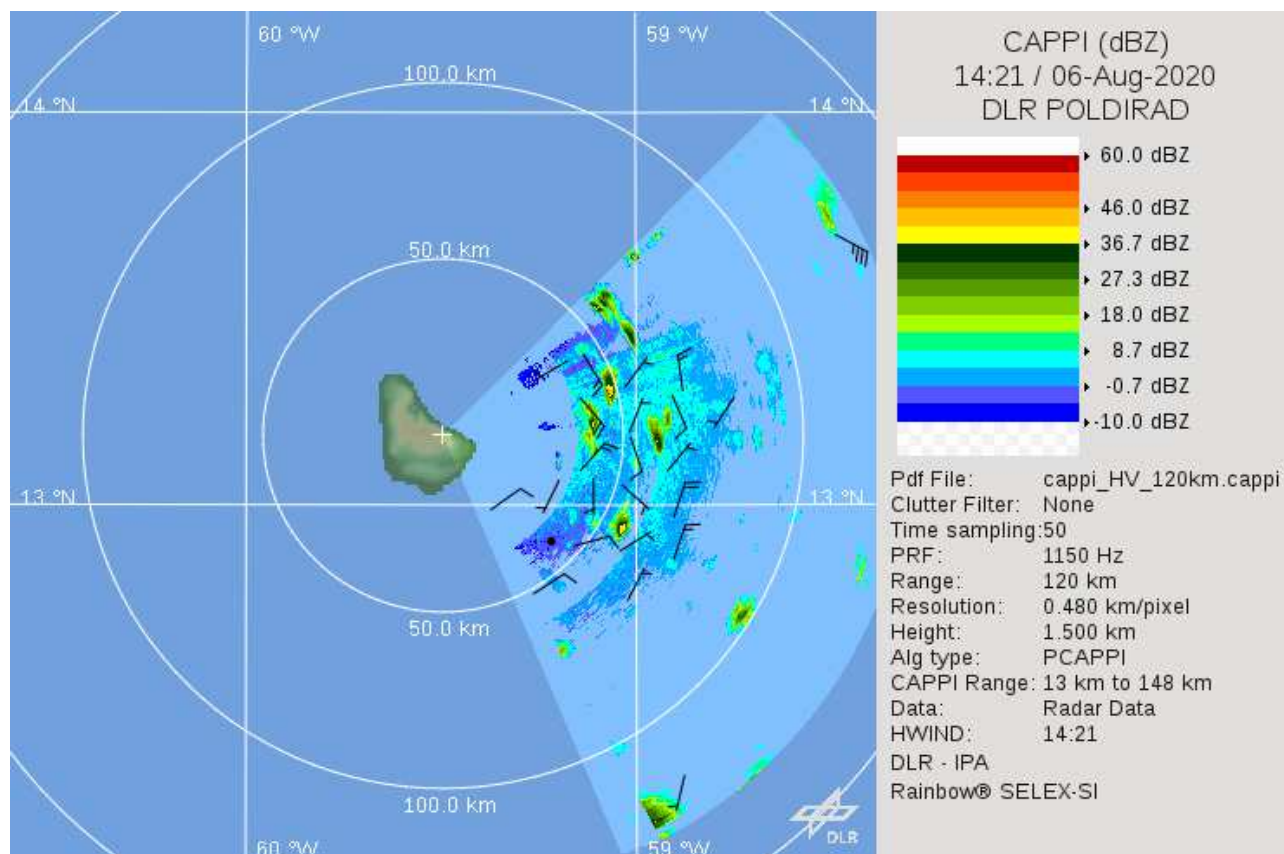


Рис. 1.2 Карта отражаемости на высоте 1.5 км

#### 1.1.4. Система Vaisala IRIS

Программное обеспечение IRIS Focus Weather Radar обладает современным дисплеем и богатым набором инструментов, которые позволяют достаточно эффективно просматривать и анализировать данные метеорологического радара. Обладает простым в использовании интерфейсом, что немаловажно для освоения и сокращения времени обучения на системе IRIS. Интерфейс позволяет отображать до четырех радарных продуктов в одном окне, синхронизируя все четыре панели по времени и местоположению (рис. 1.3).

Программный комплекс IRIS имеет стандартный набор радиолокационной информации, при этом предоставляет возможность прогнозировать развитие процесса.

**1.1.5. АМРК «Метеоячейка»**, созданный АО «ВНИИРА» совместно с ФГБУ «ГГО» в конце 1980-х и усовершенствованный ООО «Институт радарной метеорологии» (ИРАМ), предназначен для штормооповещения и метеообеспечения авиации; **АМРК «Метеоячейка»** предназначен для обеспечения аэропортов и автоматизированных систем управления воздушным движением информацией об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал) в удобном для потребителя виде. АМРК имеет повышенную помехозащищенность и позволяет эксплуатировать МРЛ в условиях аэропорта в дистанционном режиме управления с использованием обычных кроссовых линий связи. В состав оборудования АМРК входят:

- метеорологический радиолокатор МРЛ-5;
- устройство первичной обработки информации (УПО-ДМ);

- центральная вычислительная система АМРК (ЦС);
- специализированные рабочие станции потребителей информации.

Основной задачей ЦС является управление работой МРЛ, анализ и интерпретация результатов измерений, а также передача данных потребителям в необходимом объеме.

Возможности АМРК «Метеоячейка»:

- управление работой МРЛ в дистанционном режиме;
- контроль параметров АМРК в допусковом режиме, что является актуальным при дистанционном управлении МРЛ;
- проведение обзора и обработки данных наблюдений;
- представление данных в виде карт: метеоявлений, высот верхней границы поля радиоэха, опасных явлений погоды, отражаемости в 11 слоях, интенсивности осадков, количества осадков за любой период времени, контуров опасных явлений погоды, скорости шквалов, видимости в осадках, вертикального сечения по любому азимуту и любой авиатрассе, обледенения по любому азимуту и любой авиатрассе;
- расчет скорости и направления перемещения облачной системы после каждого цикла наблюдений;
- возможность передачи данных потребителям в цифровых форматах в кодах: RADOB, BUFR, код передачи в автоматизированные системы управления воздушным движением (АС УВД), код ИРАМ для передачи на рабочие станции АМРК, а также в графических форматах BMP и T4;
- возможность печати любой карты;
- возможность передачи данных потребителям с использованием различных протоколов передачи: внутренний протокол ИРАМ; телеграфный протокол; протокол TCP/IP-socket; протокол для передачи данных в АС УВД.

– **1.1.6. АМРК АКСОПРИ**, созданный ФГБУ «ЦАО» совместно с заводом «Электромаш» и усовершенствованный ЦАО, предназначен для измерения осадков, штормооповещения и метеобеспечения авиации [204]. **АКСОПРИ** –

представляет собой автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс (АМРК), обеспечивающий автоматизацию сбора и обработки оперативной информации об опасных явлениях погоды (облачность, осадки, грозы, град, шквал), передачу информации удаленным пользователям в режиме реального времени. Программное обеспечение АКСОПРИ решает широкий круг задач: измерение осадков, штормооповещение, контроль активных воздействий. Система АКСОПРИ успешно применяется в работах по искусственному увеличению осадков и улучшению погодных условий над мегаполисом [68,70] в России и Сирийской Арабской Республике;

– 1.1.7. АСУ «Антиград», созданная НПЦ «Антиград» в 1992 - 1993 гг. для автоматизации противоградовых операций. Применяется в Аргентине;

– 1.1.8. АМРК «Мерком» - предназначен для активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков, предотвращения града и штормооповещения. Имеет компактную аппаратуру обработки информации, дополнительные датчики угловой информации. Однако использование штатной системы управления приводом (как и АКСОПРИ) не обеспечивает желаемой точности установки программно задаваемых углов обзора. К сожалению, блок первичной обработки вставляется в компьютер на шину ISA, что ограничивает возможность применения современных компьютеров, так как в них не используется шина ISA. АМРК «Мерком» установлен в МРЛ Краснодарской и Северо-Кавказской ВС Росгидромета. Однако в Северо-Кавказскую радиолокационную сеть передаются объемные файлы обзора, а не в кодах BUFR и RADOB. Поэтому информация «Мерком» в настоящее время еще не вшивается в единую радиолокационную карту погоды региона. «Мерком» создан ООО НПЦ «Экотехнологии» в 1995 - 1996 гг. для автоматизации работ по искусственному увеличению осадков и предотвращению града. Применяется в России и Узбекистане;

1.1.9. АМРК «АСУ-МРЛ», созданный ООО НПЦ «Антиград» в 2004 г.

на базе более ранней системы «АСУ-Антиград», предназначен для целей противоголовоо защиты, искусственного увеличения осадков, штормооповещения и метеобеспечения авиации [8]. Помимо программной среды «АСУ-МРЛ» имеет современную цифровую аппаратную систему, позволяющую модернизировать устаревшие МРЛ [8]. Он обеспечивает автоматическую (без участия персонала) подготовку и передачу информации в сеть штормооповещения в кодах FM-94 BUFR и RADOB в соответствии с регламентом, утвержденным Росгидрометом, сшивку в единую региональную карту погоды в системе «МАРС» (см. рис. 4.6), ввод информации в системы АСУ УВД «Строка-Ц» и «Стрела». Также система выдает данные для региональной модели прогноза погоды Weather Research and Forecast Model (WRF, NCAR). Она применяется в России, Армении, Молдове, Таджикистане, Северной Македонии, Сербии, Румынии и Болгарии. Система позволяет обрабатывать совместно радиолокационные, спутниковые и гронопеленгационные данные.

1.1.10. Системы обработки радиолокационной информации. Перечисленные в п. 1.1.7 предназначены для обработки информации отдельных МРЛ. Сшивка информации групп соседних МРЛ осуществляется в коде FM-94 BUFR в системе «МАРС», созданной ИРАМ. ФГБУ «ЦАО» создана собственная программа сшивки данных сети МРЛ «Московское кольцо».

Перечисленные системы обработки радиолокационной информации имеют различные аппаратные и программные средства, отличаются по назначению, режимам обзора пространства, радиусам действия, разрешающей способности, числу решаемых задач. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения по применению.

По мере непрерывного совершенствования этих систем их возможности унифицируются, и они в основном обеспечивают решение задач штормооповещения, метеобеспечения авиации и активных воздействий на облачные процессы. Однако управление противоголовоо операциями предусматривают только АМРК «АСУ-МРЛ» и «Мерком», которыми оснащена

сеть МРЛ противорадовых служб и которые должны быть положены в основу модернизации этих МРЛ.

## **1.2 Возможности существующих радиолокационных сетей**

Национальные радиолокационные сети созданы в России и многих странах Европы, Северной Америки, Японии и т.д. Европейская сеть объединила в себе большинство стран Европы. Основными задачами таких сетей являются оперативное информирование населения и служб о явлениях погоды, связанных с облачными процессами. Для этого решаются вопросы получения и доставки метеорологической информации на рабочее место потребителя в удобной для принятия решений форме, содержащей рекомендации практического характера. Также развиваются технологии доступа населения к радарной информации через смартфоны и другие переносные устройства. Радарные сети создаются в соответствии с требованиями потенциальных потребителей информации и инвесторов для решения широкого круга задач [14,105, 181,225].

Концепция создания радиолокационной сети включает:

- определение приоритетов, решаемых сетью, в зависимости от повторяемости опасных явлений, интенсивных осадков в каждой стране [182];
- социально-экономические факторы (учет распределения важнейших народнохозяйственных объектов по территории страны и плотности населения;
- определение перечня потребителей информации и выбор степени интеграции единого радиолокационного поля страны;
- основные принципы сбора и распространения информации потребителям;
- технико-экономическое обоснование сети и источники финансирования.

Самым ярким примером «революционного» пути создания радарной сети является реализация проекта NEXRAD в США, а «эволюционного» – создание сети в Западной Европе [105].

**1.2.1. Сеть NEXRAD США** - единая многофункциональная сеть, которая предназначена для одновременного получения информации, удовлетворяющей требованиям штормового оповещения, метеообеспечения авиации и измерения осадков. Сеть NEXRAD создавалась по федеральной целевой программе США с конца 1970-х годов тремя федеральными ведомствами: национальной метеослужбой Министерства торговли, федеральным авиационным управлением Министерства перевозок и авиационной метеослужбой Министерства обороны США. Концепции сети NEXRAD предусматривала обеспечение основных требований этих ведомств: универсальность, надежность и эффективность применения сети для раннего прогноза опасных явлений, своевременное получение информации о штормовых условиях и опасной турбулентности на маршруте полета воздушных судов гражданской и военной авиации[105, 290-292].

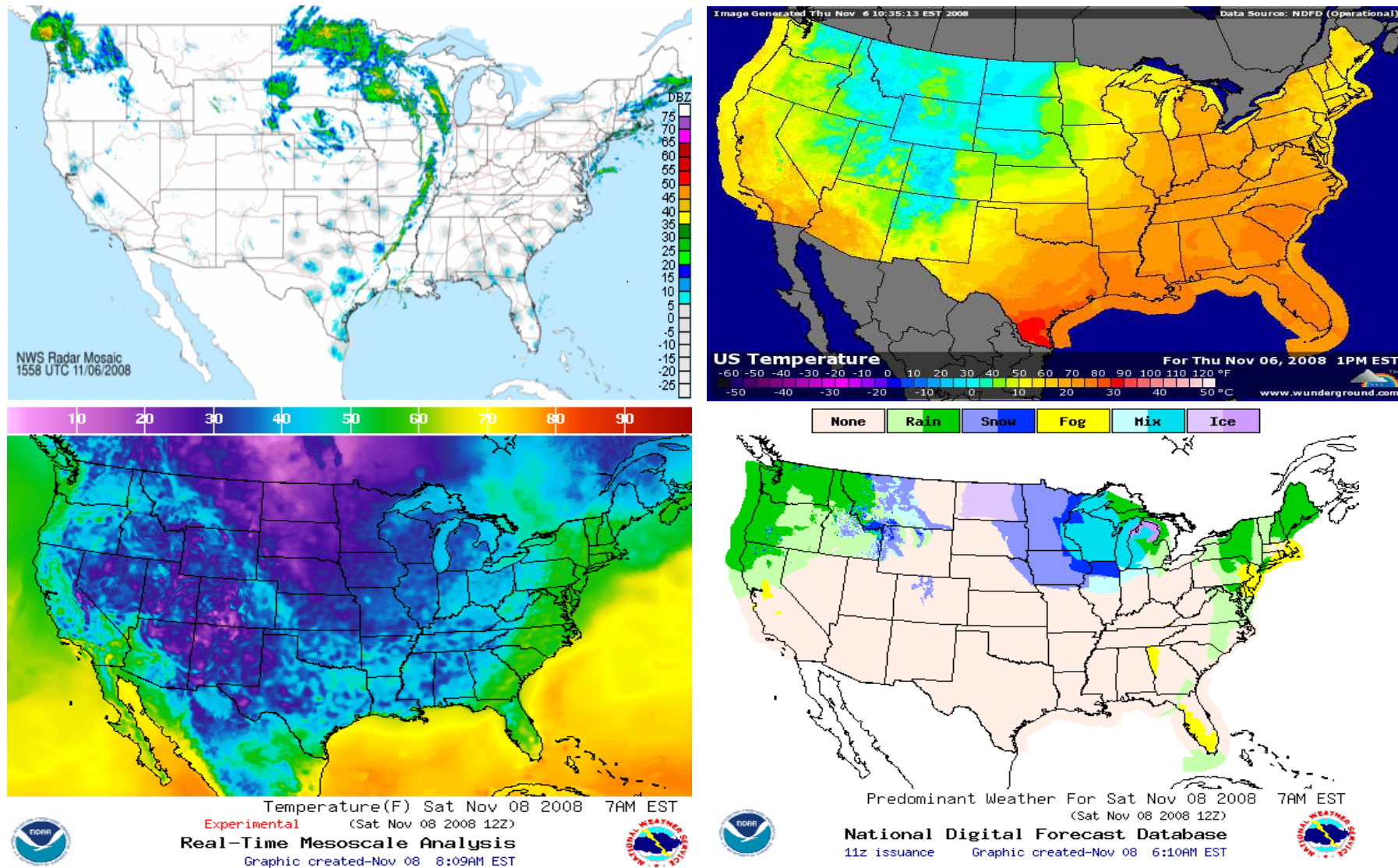


Рис. 1.4 - Пример карт метеоинформации сети NEXRAD: а) карта радиолокационной отражаемости 6.11.2008 г.; б) карта температуры 6.11.2008; в) карта температуры 08.11.2008 г.; г) карта преобладающей погоды 08.11.2008

Информация сети NEXRAD параллельно со всеми данными, необходимыми для составления текущего и краткосрочного прогнозов опасных явлений, поступает в интерактивную систему обработки данных AWIPS, на дисплее текущей погоды которого могут отображаться: карты отражаемости, осадков, радиальной скорости с WSR-88D, спутниковые карты, результаты наземных наблюдений, данные о молниях и другие сведения (рис.1.4). Совместное использование всех видов наблюдений позволяет максимально достоверно описывать погоду [125,239,283-287].

В США используется новая система оценки турбулентности, являющаяся очень важным инструментом информирования пилотов. Данная система использует алгоритм обнаружения турбулентности радаром нового поколения NEXRAD (NTDA), разработанным Национальным центром атмосферных исследований (NCAR). Система анализирует полученную от разных радаров информацию, переводя ее в численные прогнозы формирования зон турбулентности. В конечном итоге информация передается пилотам, метеорологам и диспетчерам в графическом виде в режиме реального времени. Детальная информация о системе и ее стоимости пока неизвестна. Также неизвестно и то, будут ли карты турбулентности доступны для судов гражданской авиации. Однако к 2011 году по планам разработчиков зона покрытия системы будет охватывать всю территорию США [105].

**1.2.2 Сеть МРЛ в Великобритании** состоит из 12 радиолокаторов Siemens Plessey 45C. Основная задача – осуществлять количественные измерения осадков для прогноза наводнений и краткосрочного прогноза погоды. В создании сети приняли участие Управления водными ресурсами в Англии и Уэльсе, Совет графств Девон, дирекция Военно-морской океанологии и метеорологии, Министерство сельского хозяйства, Департамент окружающей среды и сельского хозяйства[296-299].

МРЛ работают круглосуточно с цикличностью обзоров 5 мин. Зона обзора одного МРЛ – 210 км. Радиолокационные данные калибруются в реальном времени по небольшому числу проверочных дождемеров. Проверенные на

качество карты, передаваемые в COSMOS, вводятся в прогностическую модель вместе с дождемерными данными из климатологической базы данных об осадках и передаются в BBC в виде ежедневных прогнозов погоды [274].

**1.2.3 Сеть доплеровских МРЛ Испании** состоит в основном из ДМРЛ, установленных на Пиренейском полуострове, и ДМРЛ на Канарах [273,276]. При организации сети были установлены следующие приоритеты:

- обеспечение радиолокационной информацией прогностических служб для подготовки прогнозов заблаговременностью 0 - 2 ч (текущий прогноз опасных явлений для авиации), 0 - 6 ч (прогноз опасных явлений для населения), 0 - 12 ч (прогноз при интерактивном совмещении радиолокационной и спутниковой информации) [285,286,290];

- гидрология – климатология осадков для прогноза наводнений, оценки влагозапасов почвы, исследований по физике облаков и оценки возможности проведения активных воздействий [294].

МРЛ имеют радиус обзора 200 км и выдают базовые данные: отражаемость, доплеровская скорость и спектр доплеровских скоростей [135,136,167]. Обновление информации происходит через каждые 10 мин.

Выходными радарными продуктами являются: слой накопленных осадков, прогноз перемещения и начала осадков, вертикальные профили ветра.

**1.2.4 Радарная сеть Японии** состоит из 22 радиолокаторов Mitsubishi и предназначена для измерения характеристик осадков с целью прогноза наводнений и регулирования режима рек при эксплуатации плотин на горных реках. Контроль режима рек осуществляется Министерством строительства.

Радиус действия радиолокационной системы OWASAN, на базе которой создана сеть, составляет 200 км. Сеть работает круглосуточно, с темпом обновления информации 5 мин.

**1.2.5. Радарная сеть Скандинавских стран NORDRAD** работает с 1991 г., состоит из МРЛ, размещенных в Норвегии, Швеции, Финляндии, Дании, Эстонии и Латвии.

Сеть NORDRAD – автономная, дистанционно управляемая сеть МРЛ, на которой происходит обмен между национальными метеослужбами этих стран. На коммерческой основе продукты NORDRAD поставляются потребителям. Задача программного обеспечения возложена на частную компанию. На сети NORDRAD существует три главных узла сбора информации, которые служат центрами национальной сети [105].

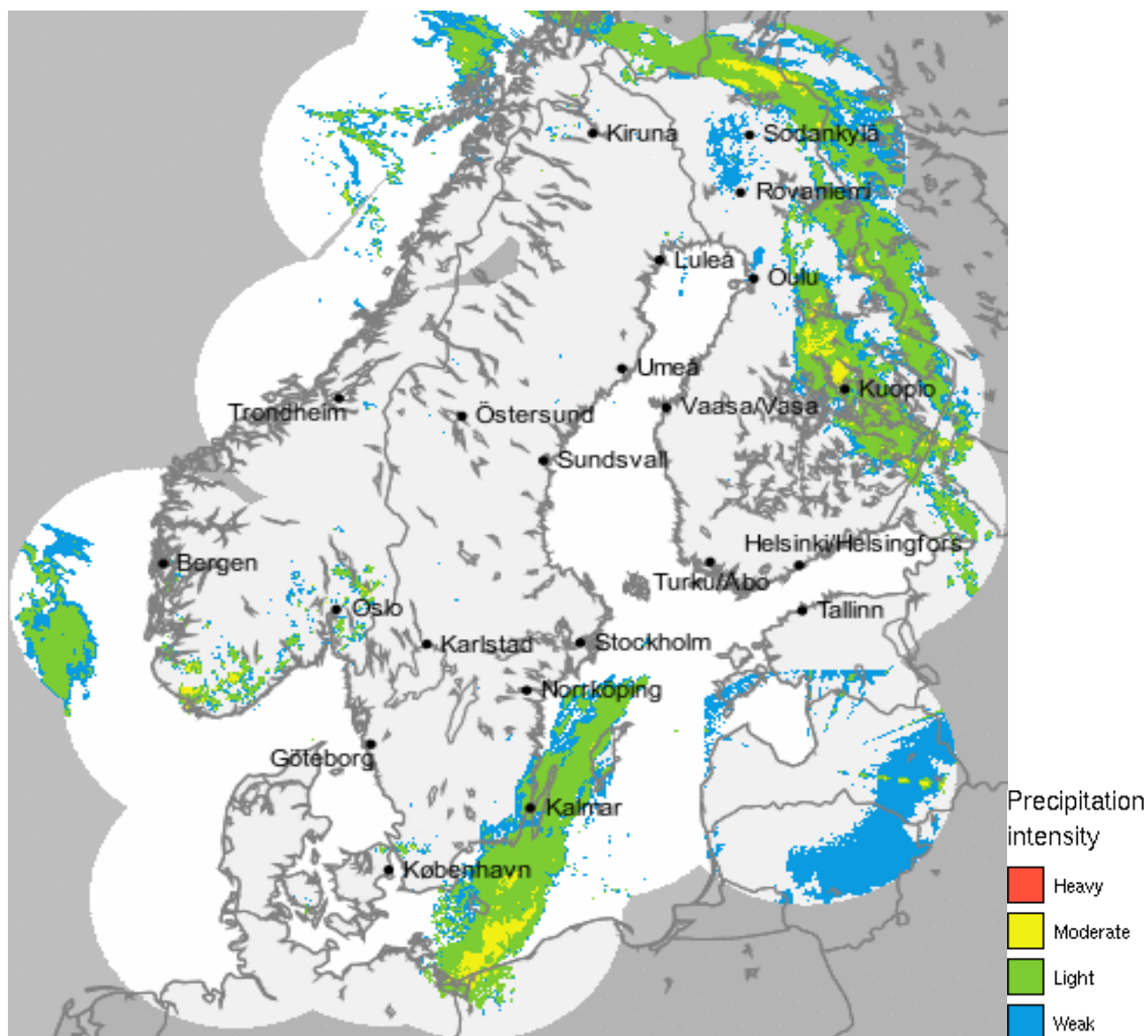


Рис. 1.5 Карта отражаемости сети NORDRAD

На рис. 1.5. приведена карта отражаемости в системе NORDRAD, которая обновляется через каждые 15 мин. Прогнозы PROMIS 600 составляются по ветру, температуре, влажности, облачности, осадкам, грозам и вероятности сильных ветров. Наиболее востребованным параметром являются осадки. Прогнозы составляются для энергетических и строительных компаний,

шведскому управлению железных дорог, местным радиостанциям, местным метеоцентрам.

**1.2.6 Международная сеть МРЛ в Западной Европе** (см. рис. 1.6) создана в рамках проектов COST-72 и COST-73 и объединяет МРЛ ряда стран (Австрия, Бельгия, Великобритания, Германия, Дания, Испания, Италия, Нидерланды, Португалия, Франция и перечисленные выше скандинавские страны).

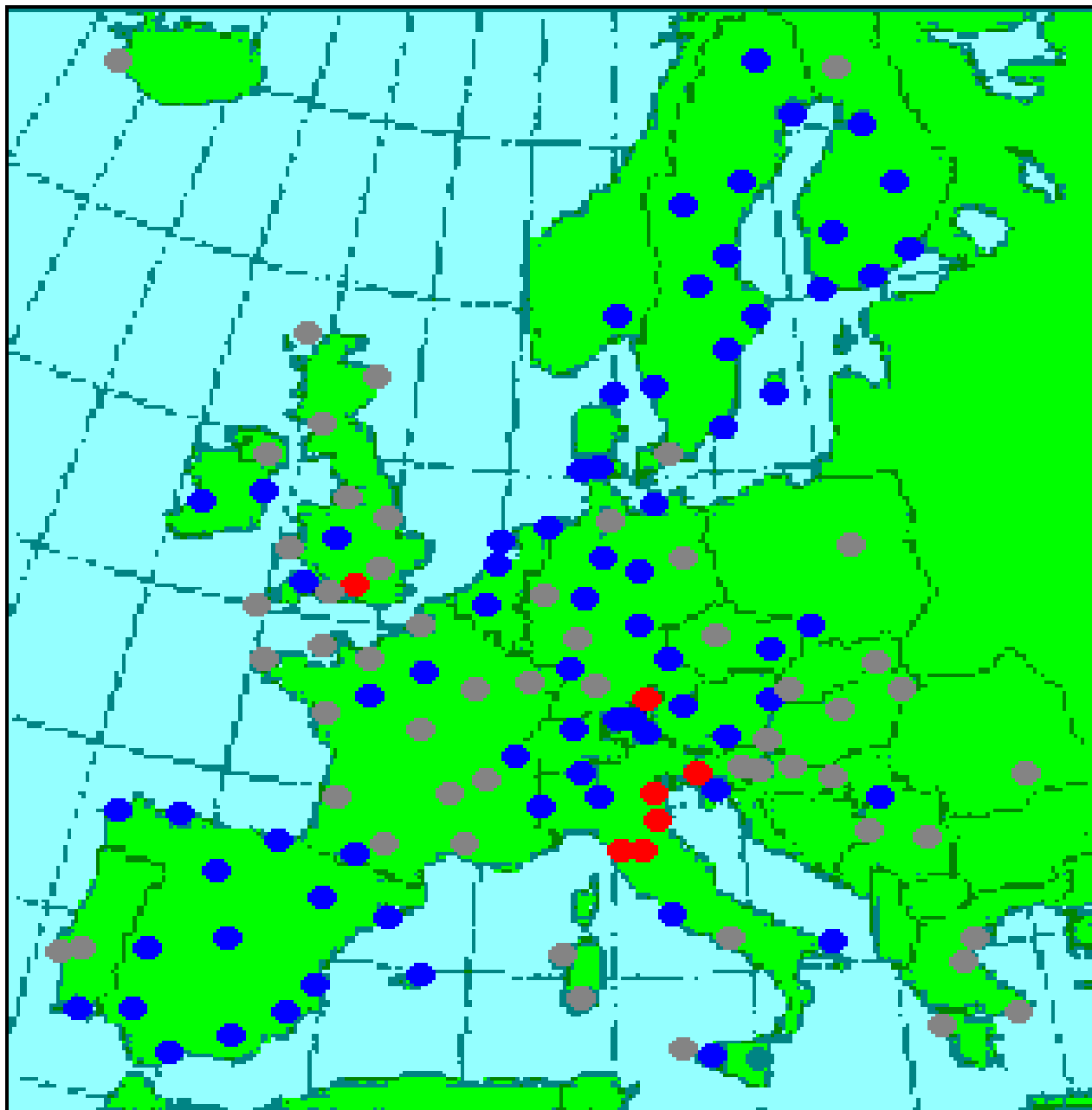


Рис. 1.6 Карта-схема расположение МРЛ в Западной Европе

• МРЛ; • ДМРЛ; • Поляриметрические МРЛ.

При создании сети в каждой стране были расставлены свои приоритеты:

– **Австрия:** Метеорологическое обеспечение авиации; штормовое обеспечение и краткосрочный прогноз; активные воздействия на град; метеообеспечение дорожного транспорта; передача опасной погоды по телевидению

– **Бельгия:** измерение осадков и гидрологический прогноз речного и городского стока; краткосрочный прогноз начала и окончания осадков.

– **Великобритания:** измерение осадков и гидрологический прогноз паводков на реках с низкими берегами и регулирование работы канализационных систем; повышение качества метеопрогноза прохождения фронтальных систем, сроков начала и окончания осадков; совмещение с данными ИСЗ METEOSAT; метеообеспечение дорожного транспорта; демонстрация радиолокационных карт осадков по телевидению.

– **Германия:** краткосрочный прогноз погоды; гидрологический прогноз паводков и наводнений на базе радиолокаторов DWD фирмы Gematronic.

– **Дания:** метеообеспечение авиации; полномасштабное обеспечение фермеров прогнозами осадков.

– **Испания:** Штормовое оповещение об опасных явлениях погоды.

– **Италия:** метеообеспечение авиации и сельскохозяйственных работ; активное воздействие на град на основе радиолокаторов ALLENIA-SMA и EEC-ERICSSON.

– **Нидерланды:** гидрология стока, регулирование работы городских канализационных систем; строительство; обслуживание эксплуатационных служб автодорог.

– **Норвегия:** краткосрочное прогнозирование опасных явлений и осадков; метеообеспечение автодорог.

– **Португалия:** управление водными ресурсами и уменьшение ущерба от опасных наводнений; метеообеспечение авиации.

– **Финляндия:** измерение осадков; метеообеспечение автодорог; штормовое оповещение об опасных явлениях погоды.

- **Франция:** прогноз опасных явлений; совмещение с данными ИСЗ; гидрологический прогноз для бассейна рек и городских канализационных систем [266].

- **Швейцария:** метеообеспечение авиации; штормовое оповещение об опасных явлениях погоды; метеообеспечение дорог; расчет потоков на горных реках.

- **Швеция:** метеообеспечение авиации; разработка адекватных моделей краткосрочного прогноза; штормовое оповещение о летних грозах; метеообеспечение дорожного транспорта в зимних условиях об интенсивности и количестве снега, вызов снегоуборочной техники; метеообеспечение сельского хозяйства в рамках системы PROMIS 600.

В каждой стране сети МРЛ разрабатывались под приоритетные задачи, использовались свои методы кодировки и распознавания передаваемой информации. Участие всех стран Западной Европы в исследовательских проектах ВМО для Европы COST-72, COST-73, COST-75 позволило создать единую европейскую сеть МРЛ с обменом информации в едином международном коде BUFR 94M. В 1998 г. была создана сеть COST-75, которая объединила 110 МРЛ, в том числе более 60 ДМРЛ [254,264-266,269,300-303]. Одной из приоритетных задач в Западной Европе стал общий региональный и локальный метеопрогноз с заблаговременностью до 3 ч. Национальные метеослужбы европейских стран предложили многообразие продуктов МРЛ: карты ИКО и ИОПВ на разных высотах; dBZ шкалы; высоты верхней границы радиоэха; VIL; вертикальные профили отражаемости и ветра; горизонтальные поля ветра.

В большинстве европейских стран требуются данные МРЛ для управления воздушным и наземным транспортом. Наиболее важными продуктами для этих целей являются прогноз опасной погоды, профили ветра и сдвиг ветра. Для стран Северной Европы важен прогноз снегопадов и зон возможного обледенения. На юге важен прогноз опасных явлений погоды – града, шквалов, интенсивности грозовой деятельности. Строгие требования предъявляются и к

информации об осадках для краткосрочного прогноза (ливень, снегопады) [268].

### **1.2.7 Развитие сети МРЛ в России**

В настоящее время радиолокационная сеть штормооповещения России состоит из более чем 70 радиолокаторов; из них – 26 радиолокаторов МРЛ-5 и 3 радиолокатора МРЛ-2 [15]. Сегодня ведутся интенсивные работы по расширению и модернизации существующей радиолокационной сети России. Данной теме посвящено множество научных работ [71,187,191,202,225]. На базе автоматизированных радиолокаторов МРЛ-5 были созданы первые три региональные радиолокационные сети:

- Московское кольцо;
- Северо-Западная сеть;
- Северо-Кавказская сеть.

Радиолокационная информация по каналам связи АСПД «Погода» передается потребителям: Гидрометцентр Росгидромета, региональные ГМЦ, региональный центр АСУ УВД и другим потребителям с циклом обновления информации 30 мин.

В рамках федеральных целевых программ «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации» и «Модернизация единой системы организации воздушного движения Российской Федерации» планировалось в 2008 - 2015 гг. создать государственную метеорологическую радиолокационную сеть из 172 радиолокационных центров на базе доплеровского МРЛ, создаваемого концерном «Алмаз-Антей». Эта сеть должна была покрывать наиболее обжитые регионы российской Федерации. Уже выбраны позиции для размещения ДМРЛ, и с 2010 г. началась реализация этого крупного проекта.

### 1.3 Радиолокационная сеть России

1.3.1 В состав сети ДМРЛ Росгидромета должно войти 140 доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С (рис. 1.7), разработки ОАО «ЛЭМЗ», устанавливаемых в рамках выполнения двух программ [225,230] –

ФЦП «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 годы)» – запланирована установка 100 радиолокаторов ДМРЛ-С,

Программа «Геофизика» – запланирована установка 40 радиолокаторов ДМРЛ-С.

В состав сети ДМРЛ могут включаться действующие и строящиеся метеорологические радиолокаторы других типов, функционирующих по единому регламенту, обеспечивающих получение сходного спектра радиолокационных продуктов и передающих первичные данные в единый центр сбора НТЦР ДМРЛ.

В качестве дополнительных источников радиолокационной информации об облачности и осадках в сети ДМРЛ Росгидромета может использоваться информация от метеоканалов аэронавигационных радиолокаторов, радиолокаторов сети военизированной службы по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы, малых метеорологических радиолокаторов.

Для обеспечения комплексного характера метеорологических измерений в состав радиолокационных позиций ДМРЛ могут включаться дополнительные средства метеорологических наблюдений: грозопеленгаторы, метеорологические станции, использующие системы электроснабжения, связи, охранной и пожарной сигнализаций ДМРЛ-С.

Начало развертывания радиолокационной сети ДМРЛ-С Росгидромета приходится на 2011 г. Первый радиолокатор ДМРЛ-С был установлен на позиции «Валдай», в 2010 г. он прошел Государственные Испытания. В течение

января-октября 2011 г. находился в опытной эксплуатации.

Каждому радиолокатору ДМРЛ в сети Росгидромета по представлению ЦАО АМТК присваивает четырехбуквенный индекс СССР для идентификации источника информации сообщений в коде BUFR, например RUWJ – для позиции «Валдай». Также каждому радиолокатору по представлению ЦАО Гидрометцентром РФ присваивается международный пятизначный цифровой идентификационный номер, например 39461 – для ДМРЛ «Валдай».

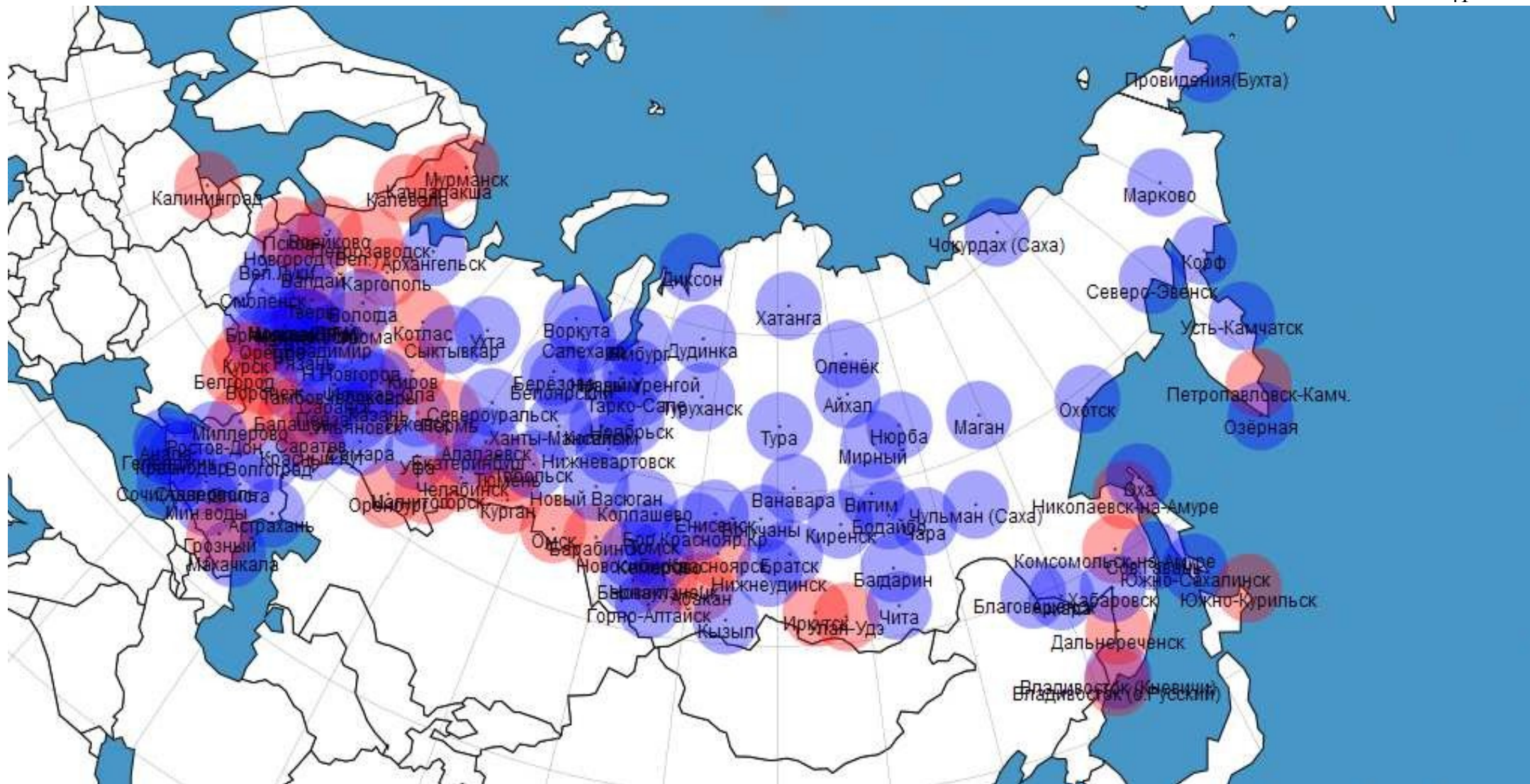


Рис. 1.7 Запланированный состав сети ДМРЛ-С Росгидромета на конец 2020 г. [225]

- планирование подключения к СПДМУ на этапе проектирования новой позиции ДМРЛ, включая «последнюю милю»;
- присвоение идентификаторов (СССС) ДМРЛ и ведение их реестра;
- управление маршрутизацией информационных потоков в сети (первичных данных и вторичных р/л продуктов и их доставку потребителям);
- обеспечение мониторинга качества каналов связи и, при необходимости, контроль ремонта каналов операторами связи;
- обеспечение информационной безопасности СПДМУ ДМРЛ, включая защиту от несанкционированного доступа изнутри (из сети ВСС) и извне (из сети Интернет) отдельных радиолокаторов, НТЦР ДМРЛ в ЦАО (до терминального оборудования сети ВСС);
- подключение/отключение от сети отдельных ДМРЛ (в связи с их неработоспособностью и пр.) по Уведомлениям ЦАО (сообщениям о временном выводе из состава сети и вводе в состав сети ДМРЛ);
- распространение р/л продуктов как отдельных ДМРЛ, так и сетевых продуктов пользователям по согласованию с ЦАО.

### **Использование спутниковой системы для сбора данных ДМРЛ**

Спутниковая система сбора данных может рассматриваться как резервная, но она может рассматриваться и как самостоятельная система. В первую очередь, это связано с ценой на услуги связи для спутниковой системы по сравнению с ценой на услуги наземной системы, особенно её «последней мили». Кроме того, для части мест размещения ДМРЛ-С невозможно создать подключение по наземной сети, причем это может иметь место не только в восточных районах страны, но и в центральных и западных районах. Поэтому спутниковая система должна покрывать всю территорию размещения ДМРЛ-С.

При техническом проектировании использования спутниковой системы сбора необходимо придерживаться следующих технических требований:

- Предоставить услуги спутниковой связи для передачи данных со станции

наблюдений (ДМРЛ) до точки присутствия ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» на узле ММТС-9 или ММТС-10.

- Пропускная способность одного канала связи должны быть не менее 512 Кбит/сек от ДМРЛ и 64-256 Кбит/сек в сторону ДМРЛ.

- Спутниковый канал связи должен быть включен в групповой спутниковый канал Росгидромета, который будет формироваться из отдельных спутниковых каналов станций на местах установки ДМРЛ Росгидромета.

- Спутниковый канал связи должен быть организован по технологии VSAT в Ku-диапазоне на отечественных ИСЗ. Построение сети должно соответствовать архитектуре «Звезда» (могут быть рассмотрены другие диапазоны частот при условии сохранения или повышения надежности спутникового канала).

- Назначение IP адреса на оборудовании станции из адресного пространства ведомственной сети связи «Росгидромета».

- После формирования группового канала как минимум из двух станций, предоставить возможность в рабочем порядке подавать заявку на переназначение гарантированной скорости (CIR) от станции.

- Динамическое выделение дополнительной скорости для канала от общей скорости группового канала, свободной в данный момент.

- Обеспечить следующие параметры качества и надежности предоставления услуги спутниковой связи:

- количество пакетов с ошибками: не более 0,01%;
- коэффициент готовности потока: не ниже 0.96;
- джиттер не более 600мс;
- процент потери пакетов в месяц не более 1%.

- Канал спутниковой связи должен предоставляться непрерывно (24 часа в сутки, 7 дней в неделю, 365 дней в году).

- Должна быть обеспечена круглосуточная бесплатная техническая

поддержка и проведение консультаций в случае возникновения нештатных ситуаций в работе. Поскольку эта система может использоваться для сбора данных наблюдений и с других платформ, в первую очередь с труднодоступных, то в общие требования нужно было бы добавить требования минимизации расхода на электроэнергию. Например, ограничить мощность терминального оборудования до 100 Вт в активном режиме; ввести спящий режим с потреблением мощности не более 10 Вт; ввести возможность управления со стороны центра управления (спутника) мощностью сигнала терминального оборудования в зависимости от качества получаемого от него сигнала.

### **Радиолокационные продукты сети ДМРЛ**

Метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С объединяет в своей конструкции все современные достижения в области радиометеорологии: он обеспечивает автоматизированные доплеровские и поляризационные измерения параметров облачности и осадков с высоким пространственным (элемент карты 1х1 км) и временным (цикл обзора – 10 минут) разрешением в зоне обзора радиусом 250 км [56,91,99].

Доплеровский измерительный канал ДМРЛ-С обеспечивает получение характеристик поля ветра в зоне радиолокационного обзора – горизонтальный ветер на разных высотах, осредненный вертикальный профиль ветра, оценку турбулентности и сдвигов ветра [92,166,169]. Поляризационные измерения позволяют уточнить измерения интенсивности осадков, провести оценку фазы осадков (снег/дождь/смеш. фаза). Доплеровский и поляризационный каналы обеспечивают фильтрацию отражений неметеорологической природы – отражений от «местных предметов», помех (птицы, насекомые) и т.д.

Объединение радиолокаторов в единую сеть обеспечивает принципиально более высокое качество радиолокационных метеорологических наблюдений, что доказано на примере функционирования 160 ДМРЛ в сети NEXRAD (США). Проведение круглосуточных р/л наблюдений ДМРЛ-С по единому регламенту

с использованием единого ПО, управление наблюдениями и обработка данных наблюдений в едином центре НТЦР ДМРЛ должны обеспечить новое качество радиометеорологических наблюдений в Росгидромете, недоступное ранее при проведении наблюдений на МРЛ-5 с разрешением 4x4 км и режимом наблюдений обзора в 30 мин/3 часа.

Построение единого радиолокационного поля позволит получить мгновенную целостную картину распределения зон облачности и осадков по территории РФ, что позволит объединить радиолокационную, гронопеленгационную информацию с данными наземных наблюдений на сети МС.

Наконец, объединение отдельных ДМРЛ-С в сеть скоростными каналами связи позволит не только получать в режиме реального времени объединенные карты по данным наблюдений всей сети, но и подключить к обработке радиолокационных данных информацию численных моделей погоды для уточнения р/л карты метеоявлений. В свою очередь, данные радиолокационных измерений (доплеровская скорость и отражаемость) активно используется в инициализации и верификации численных моделей погоды.

### **1.3.2 Первичные радиолокационные продукты ДМРЛ**

Первичные данные (объемные файлы) – это данные радиолокационных наблюдений, получаемые в системе первичной обработки (ПОИ) и передаваемые на вход вторичной обработки (ВОИ) радиолокатора ДМРЛ-С [68,179,187,188,229].

До недавнего времени в ДМРЛ-С непосредственно измеряли 6 параметров, но недавно к шести добавился седьмой параметр:  $K_{dp}$  – удельная дифференциальная фаза, используемая в поляризационных алгоритмах расчета интенсивности осадков.

Первичные продукты, полученные в ходе радиолокационного обзора в ПОИ ДМРЛ на ЦУВК передаются для вторичной (метеорологической) обработки (ВОИ) на УУВК в виде конических сечений, с разрешением по азимуту 1 градус

и по дальности 500 м (режим «Отражаемость», дальность 250 км), или по дальности 250 м (режим «Скорость», дальность 150 км), кодирование 8 бит.

В режиме «Отражаемость» распределение радиолокационных параметров по 24 коническим сечениям на различных вертикальных углах зондирования с разрешением  $1^\circ$  по азимуту и 500 элементов по дальности по каждому азимуту. Максимальный объем информации для одного измеряемого параметра по всей верхней полусфере радиусом 250 км составляет более 4 МБ. Если ограничить область радиолокационных наблюдений цилиндром с радиусом 250 км и высотой 20 км, максимальный объем информации сокращается в 1,67 раза и составляет 2,5 МБ.

Максимальный объем информации, который может быть получен в режиме «Отражаемость», в настоящее время составляет 15-20 МБ за один 10-минутный цикл измерений.

### **1.3.5 Вторичные радиолокационные продукты ДМРЛ**

Вторичная (метеорологическая) обработка производится на удаленном управляющем вычислительном комплексе (УУВК) под управлением ПО ВОИ «ГИМЕТ- 2010», прошедшем Государственные Испытания в составе радиолокатора ДМРЛ-С в 2010 г. на позиции «Валдай» и получившем в составе ДМРЛ-С сертификат Межгосударственного Авиационного Комитета (МАК) в 2013 г.

Традиционно в РФ обработка данных метеорологических радиолокационных наблюдений проводится на горизонтальных сечениях постоянной высоты над уровнем моря (CARPI). Сечения вторичных радиолокационных продуктов (будем называть их продуктами уровня L2) строятся в ПО ВОИ на постоянной высоте через 1 км, в декартовых координатах, с пространственным разрешением 1x1 км, 2x2 км, 4x4 км, в азимутальной равнопромежуточной проекции с центром в точке размещения ДМРЛ.

Вторичные радиолокационные продукты (уровень L2) ДМРЛ включают следующие карты:

- 1)  $Z$  — горизонтальная р/л отражаемость после вычитания эха «местников» и помех, dbZ,
- 2)  $V$  — доплеровская радиальная скорость, в м/с,
- 3)  $W$  — ширина доплеровского спектра, м/с,
- 4)  $Z_{dr}$  — дифференциальная отражаемость, дБ,
- 5)  $CC$  — коэффициент кросскорреляции горизонтального/вертикального каналов,
- 6)  $F_{dp}$  — дифференциальная фаза
- 7)  $S_g$  — горизонтальный сдвиг ветра, 1/с,
- 8)  $S_v$  — вертикальный сдвиг ветра, 1/с,
- 9)  $T_b$  — турбулентность,
- 10)  $WP$  — профиль скорости и направления ветра через 100 м по высоте
- 11)  $HW$  — горизонтальный ветер, м/с.
- 12)  $HBGO$  — верхняя граница облачности. км,
- 13)  $L$  — нижняя граница облачности. км,
- 14)  $S$  — метеорологические явления,
- 15)  $R$  — интенсивность осадков, мм/ч,
- 16)  $Q$  — накопленные суммы осадков: за 1, 3, 6, 12 часов.
- 17)  $K_{dp}$  — удельная дифференциальная фаза.

Большинство продуктов уровня L2 в одном из доступных разрешений хранится в сокращенном формате файлов для абонентских пунктов или просто – формате АП. По мере развития методов и алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010» номенклатура вторичных продуктов будет расширяться за счет включения новых продуктов с учетом передового зарубежного опыта и требований потребителей радиолокационной информации.

### **Продукты единого радиолокационного поля ДМРЛ**

Сеть ДМРЛ Росгидромета проектировалась с расчетом создания непрерывного радиолокационного поля (ЕРП) над территорией РФ.

Проведение автоматизированных синхронных радиолокационных

наблюдений по единой программе и единому регламенту на всех позициях, включенных в сеть, должно обеспечить возможность получения р/л продуктов ЕРП уровня L3.

Данный подход должен обеспечить в продуктах L3 решение задач, ранее недоступных для решения при обработке данных отдельных МРЛ или небольших сетей МРЛ:

- построение «объединенных» карт радиолокационных продуктов дает общую картину распределения и перемещения зон облачности и осадков по территории РФ,
- компенсация эффектов ослабления радиоизлучения в осадках, блокировки зондирующего излучения естественными и искусственными препятствиями за счет объединения информации от нескольких ДМРЛ,
- выявление проблем ДМРЛ за счет сопоставления информации от нескольких ДМРЛ в зонах пересечения их наблюдений.

Построение продуктов L3 возможно по данным низкого разрешения (4x4 км), полученным потребителями в коде BUFR по сети АСПД, с возможностью отображения, например, на АРМ «ГИСМЕТЕО». Построение продуктов L3 с высоким разрешением (1x1 км) производится в НТЦР ДМРЛ, где проводится обработка первичных данных всех радиолокаторов, включенных в сеть ДМРЛ.

На следующем этапе разрабатывается ПО визуализации ДМРЛ, обеспечивающее объединение р/л информации высокого разрешения, предназначенное для работы с полным архивом наблюдений в НТЦР ДМРЛ.

Также возможна разработка ПО визуализации информации ДМРЛ, обеспечивающее «сшивку» абонентских файлов ДМРЛ. Данный продукт, «сетевой абонентский пункт», предназначен для установки в региональных прогностических центрах Росгидромета и работы с локальным архивом радиолокационных файлов в формате АП от нескольких соседних ДМРЛ-С [69].

### **1.3.6 Показатели качества наблюдений сети ДМРЛ**

Оценку качества радиолокационных наблюдений необходимо проводить, прежде всего, по соответствию зафиксированных ДМРЛ явлений с фактически наблюдавшимися. Для оценки качества идентификации опасных явлений погоды (ОЯП) также используются такие характеристики, как оправдываемость и достоверность фиксации ОЯ [68, 69].

Оправдываемость ОЯП по ДМРЛ – это вероятность обнаружения радиолокатором зафиксированных наблюдателем опасных явлений погоды.

Достоверность ОЯП по ДМРЛ – это вероятность подтверждённых наблюдателем ОЯП, отмеченных радиолокатором в радиусе  $r$  от советующей метеостанции.

Основным эталонным источником информации для верификации ДМРЛ в настоящее время являются наземная наблюдательная сеть и аэрологическая сеть Росгидромета. В качестве дополнительных источников эталонной информации могут использоваться данные грозопеленгационной сети и атмосферных профиломеров, а также метеорологических спутников Земли, которые должны быть обеспечены надежными методиками оценки точности измерений характеристик облаков и осадков [58,63,66,116,138,161,184].

Для контроля калибровки ДМРЛ используются данные наземной осадкомерной сети (МС). Точность абсолютной калибровки должна контролироваться на временном интервале не менее месяца, с числом дней с осадками (более 0.4 мм за 12 часов) не менее 10.

Радиолокационная карта метеоявлений в настоящее время является одним из основных типов вторичных продуктов [19,89].

Для контроля качества работы алгоритма идентификации ОЯП ДМРЛ предлагается использовать данные эталонных измерений (например, данные МС в кодах КН-01, WAREP и пр.) о зафиксированных метеоявлениях [89].

Количественными характеристиками качества идентификации ОЯ (гроз) могут служить следующие два параметра:

Оправдываемость – вероятность обнаружения на ДМРЛ-С гроз, зафиксированных эталоном. Оправдываемость  $Р_{опр}$  рассчитывается как

отношение числа случаев (10- минутных сроков), зафиксированных эталоном измерения гроз, совпавших с грозами по ДМРЛ-С;

В качестве эталонной информации для оценки достоверности гроз по ДМРЛ-С привлекаются данные наблюдений метеостанций Росгидромета, грозопеленгаторов и действующих АМРК (АКСОПРИ, «Метеоячейка» и др.).

#### **1.4 Ячейковая структура градовых процессов**

Исследованию пространственной структуры и динамики развития градовых облаков уделялось большое внимание. Учеными США, Канады и Англии [100–104,113] были выделены *3 идеализированных типа градовых облаков* и изучены особенности в их строении и динамике развития. Дальнейшее развитие эти исследования получили в работах М.Т. Абшаева [7,17], которым предложена более детальная классификация градовых процессов.

В основу классификации грозоградовых процессов были положены [1,11] особенности и отличительные признаки в:

- ячейковой структуре облачности и динамике развития облачной системы в целом;
- строении конвективной ячейки (КЯ) (осесимметричные, несимметричные, взаимодействующие и невзаимодействующие);
- динамике развития и продолжительности существования КЯ;
- закономерности зарождения новых и диссипации старых КЯ в пространстве и времени;
- направлении и скорости перемещения КЯ относительно ведущего потока и облачной системы;
- термодинамических и аэросиноптических условиях развития.

Всесторонний анализ особенностей строения и динамики развития градовых процессов различных регионов показал, что многообразие всевозможных термодинамических и аэросиноптических состояний атмосферы

обуславливает формирование целого спектра градовых процессов.

В градовых процессах Северного Кавказа и других регионов, выделяют следующие основные типы, имеющие существенные различия, в особенности в строении и динамике развития [51,139]:

- *одноячейковые* процессы с осесимметричными не взаимодействующими между собой малоподвижными короткоживущими КЯ, развивающиеся в дни со слабым ветром и малыми сдвигами ветра в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления;

- *неупорядоченные многоячейковые* процессы с осесимметричными и несимметричными слабо взаимодействующими между собой КЯ, возникающими в любой части облачной системы и движущимися в разных направлениях с разной скоростью, развивающиеся в дни с переменными по высоте направлением и скоростью ветра;

- *упорядоченные многоячейковые* процессы с несимметричными, периодически возникающими и взаимодействующими между собой КЯ, движущимися вправо от направления перемещения облачной системы, развивающиеся в дни с прохождением холодных фронтов, когда ветер по всем высотам имеет одно направление, а его скорость нарастает с высотой;

- процессы *переходного типа* (с модификациями) фронтального происхождения, имеющие в структуре и динамике развития особенности упорядоченных многоячейковых и суперячейковых процессов;

- *суперячейковые* процессы, состоящие из одной мощной долгоживущей осесимметричной КЯ, длительное время существующей в стадии квази стационарного состояния, движущиеся вправо от среднего ветра в слое 5-7 км над уровнем моря (ведущего потока), развивающиеся в дни с фронтами окклюзии по типу холодного с нарастающей по высоте скоростью ветра, имеющего правый разворот на  $90^0$ - $180^0$  в нижнем слое тропосферы;

- шквальные линии (фронтальная полоса грозových очагов), предшествующие формированию последних 4 типов градовых процессов.

При этом факт развития градовых процессов и их интенсивность

обусловлены конвективной неустойчивостью и влагосодержанием атмосферы, а пространственная структура и динамика развития градовых облаков (и, следовательно, тип градового процесса) определяются пространственной структурой ветра в атмосфере и в некоторой степени орографией. Многообразие аэросиноптических ситуаций в атмосфере обуславливает развитие вышеуказанного спектра типов градовых процессов.

Кроме того, *несимметричные КЯ* градовых процессов по особенностям строения и эволюции во времени нами разделены на два класса:

***КЯ с правосторонним развитием***, имеющие области восходящего потока и нового роста на правом наветренном фланге и движущиеся вправо от ведущего потока, характерные для Северного полушария;

***КЯ с левосторонним развитием***, имеющие область восходящего потока и нового роста на левом наветренном фланге и движущиеся влево от ведущего потока, характерные для градовых процессов Южного полушария (но в некоторых случаях развивающиеся и на Северном Кавказе).

Повторяемость градовых процессов различных типов зависит от региона наблюдений, и в каждом регионе меняется от года к году в зависимости от характера атмосферной циркуляции. Например, на Северном Кавказе повторяемость одначейковых, неупорядоченных многоячейковых, упорядоченных многоячейковых, переходного типа и суперячейковых градовых процессов в среднем составляет 21%, 24%, 29%, 15% и 11%, соответственно [9, 11].

Состояние атмосферы в дни с мощными градовыми процессами различных типов всегда характеризуется повышенным влагосодержанием и конвективной неустойчивостью и существенно отличается лишь пространственной структурой ветра.

#### **1.4.1 Особенности ячейковой структуры одначейковых ГГП**

Одначейковые градовые процессы [1,193,234] имеют следующие особенности:

– они развиваются в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления и состоят из нескольких одновременно существующих пространственно изолированных (иногда и неизолированных), не взаимодействующих между собой осесимметричных конвективных ячеек (КЯ), имеющих разные стадии развития.

Радиоэхо конвективных ячеек в горизонтальном сечении имеет круглую или овальную форму, а в вертикальном сечении – обычно осесимметричную, форму, оно существенно трансформируется во времени и может служить показателем стадии развития. Поперечные размеры радиоэха конвективных ячеек составляют 5 – 15 км. Первое радиоэхо КЯ появляется над зоной восходящих потоков в виде накрывающего их сверху навеса после длительного (25 – 30 мин) развития конвективного облака и конденсационного роста облачных частиц на стадии начала коагуляционного роста частиц.

КЯ малоподвижны, но могут перемещаться с относительно малыми скоростями (5 – 25 км/ч) по разным направлениям (под влиянием орографической циркуляции).

Место зарождения новых КЯ носит случайный характер и определяется контактной конвекцией, обусловленной характером рельефа и подстилающей поверхности. Вследствие короткого времени жизни и малой подвижности КЯ град из них выпадает кратковременно локальными пятнами поперечными размерами порядка 1 – 5 км. Облачная система не имеет преимущественного направления движения. Новые КЯ возникают независимо от местоположения предыдущих и слабо дрейфуют на местности с разной скоростью по разным направлениям.

#### **1.4.2 Особенности ячейковой структуры многоячейковых ГГП**

Облачная система многоячейковых процессов состоит из нескольких одновременно существующих КЯ (см. рис. 1.8), находящихся на разных стадиях развития, имеющих поперечные размеры порядка 30 - 90 км, высоту

радиоэха 10 – 14 км. В зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере могут реализоваться три различных по строению и динамике развития подтипа многоячейковых процессов: упорядоченные, неупорядоченные и слабо организованные [165].

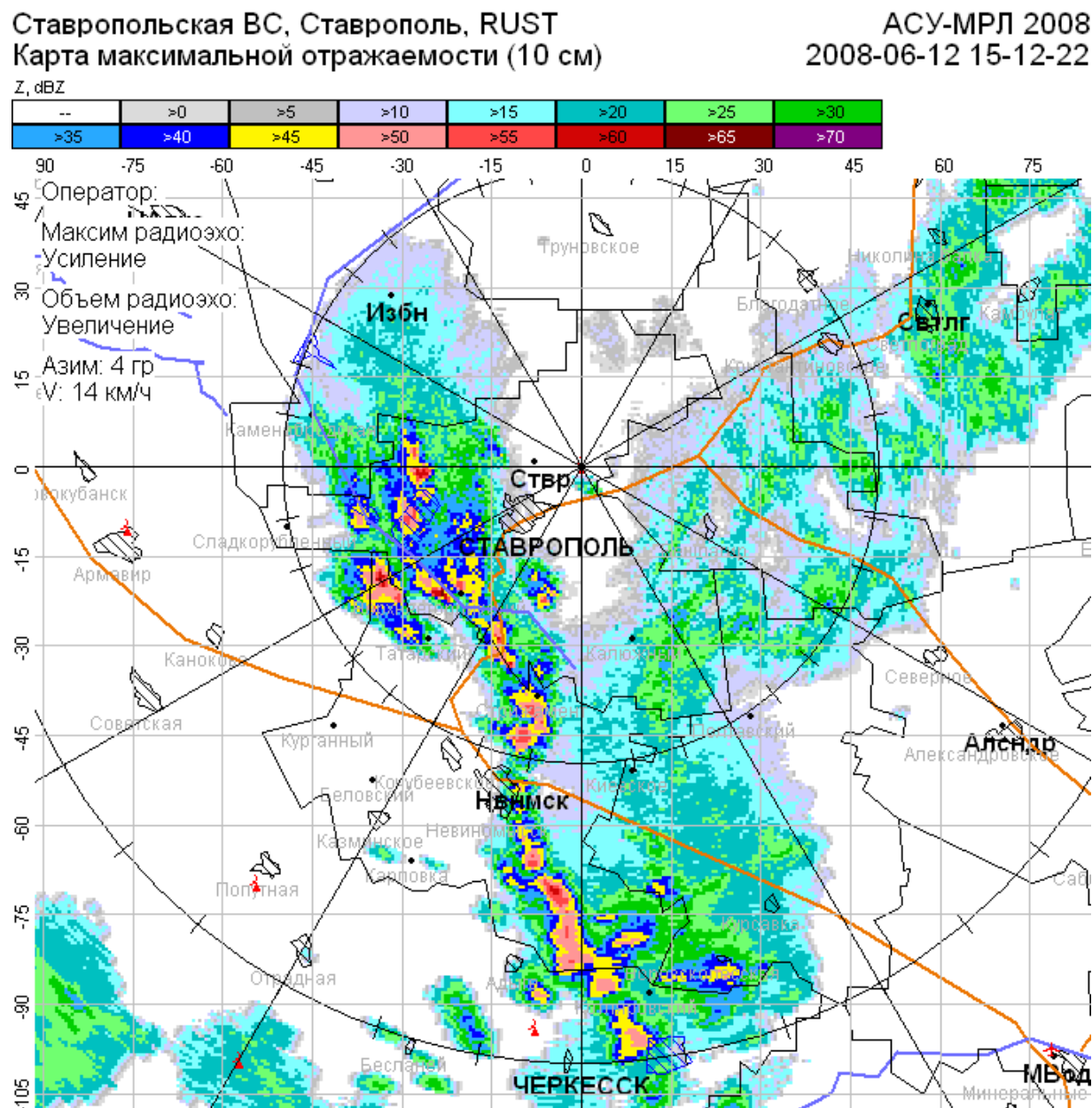


Рис. 1.8 Облачная система многоячейкового процесса

А) *Неупорядоченные многоячейковые процессы* являются переходным типом процессов от одноячейковых к упорядоченным многоячейковым. Они развиваются в дни, когда направление ветра в атмосфере изменяется с высотой (например, в приземном слое - восточный, в слое 3 – 5 км – юго-западный, в

слое 5 – 8 км – северо-западный и т. п.), а его скорость значительна на всех высотах. Такая структура ветра обуславливает асимметрию конвективных ячеек, находящихся на периферии облачной системы, разное направление наклона и навеса их радиоэха и даже разные направления и скорости перемещения. Их особенностями является следующее:

- облачная система неупорядоченных многоячейковых процессов состоит из нескольких, а в некоторых случаях из множества слабо взаимодействующих между собой КЯ, находящихся на разных стадиях развития;

- КЯ могут иметь осесимметричную или несимметричную структуру в зависимости от своего местоположения в облачной системе. КЯ, находящиеся в центре облачной системы преимущественно осе симметричны, а КЯ на периферии облачной системы обычно имеют несимметричное строение. Они могут иметь навес радиоэха, указывающий на местоположение струи восходящего потока;

- направление навеса радиоэха для разных КЯ обычно различно и связано с направлением действующего на них потока (навес радиоэха КЯ может быть ориентирован как вправо, так и влево от ведущего потока), и они могут характеризоваться как ячейки с левосторонним и правосторонним развитием;

- КЯ могут возникать в любой части облачной системы и иметь различные направления и скорости перемещения;

- место возникновения новых КЯ и диссипации «старых» трудно предсказать. Трудно также различить «молодые» и «старые» КЯ, что осложняет активное воздействие (АВ) с целью предотвращения града [172,211];

- направление и скорость перемещения КЯ может существенно отличаться;

- град может выпадать пятнами из малоподвижных ячеек и полосами из несимметричных перемещающихся КЯ, сопровождаясь интенсивными градобитиями.

Неупорядоченные многоячейковые градовые процессы наблюдаются либо при внутримассовом развитии в дни с указанной выше структурой ветра, либо при прохождении холодных фронтов с волнами и сложной синоптической обстановкой (например, при влиянии нескольких близко расположенных циклонических образований).

Б) *Слабоорганизованные многоячейковые* процессы развиваются в дни с плавно изменяющейся по высоте, направлению и значительной на всех высотах скоростью ветра в относительно сухой в приземном слое воздушной массе и имеют следующие особенности:

- облачная система состоит из небольшого числа (2 – 4) КЯ и перемещается по ведущему потоку, либо несколько правее;
- все (или большинство) КЯ возникают и распадаются одновременно, в отличие от упорядоченных процессов, без смены одних КЯ другими;
- КЯ имеют относительно небольшие поперечники, но значительную высоту (9 – 11 км) и изогнутую форму на картине вертикального сечения и движутся почти параллельно друг другу в одном направлении.

Слабоорганизованные процессы встречаются относительно редко, они слабее вышеописанных, и градовых осадков при них обычно не наблюдается [15]

В) *Упорядоченные многоячейковые процессы* представляют собой класс хорошо организованных по структуре и динамике развития градовых процессов, которые имеют следующие отличительные особенности:

- облачная система состоит обычно из 3-4 несимметричных взаимодействующих между собой КЯ;
- упорядоченный многоячейковый процесс периодически обновляется за счет систематического развития «новых» КЯ на правом наветренном фланге. Усиление очередной КЯ приводит к зарождению на ее правом фланге новой КЯ, которая, быстро развиваясь, своими осадками частично подавляет восходящий поток, питающий предыдущую «старую» (материнскую) КЯ,

приводит к ее ослаблению и оттесняет на левый фланг;

- периодичность появления новых ячеек в условиях Северного Кавказа составляет 10 – 30 минут;

- за время существования упорядоченных многоячейковых процессов может развиваться несколько, а иногда и десятки КЯ;

- диссипация «старых» происходит на левом фланге облачной системы;

- КЯ многоячейкового процесса имеют структуру и поведение, подобные структуре и поведению ячеек однопячейковых процессов, но имеют при этом значительную асимметричность и наклон в направлении перемещения или вправо от него в виде навеса мощного радиоэха, являющегося указателем области восходящих потоков, выделяемой в структуре радиоэха как область слабого радиоэха. Время существования этой области составляет 10 – 20 минут, а скорость восходящих потоков по данным ракетного и доплеровского зондирования может достигать 20 – 40 м/с;

- градовый очаг располагается преимущественно на наветренной стороне КЯ, а область восходящего потока – впереди и правее градового очага, зачастую он имеет наклон в сторону зоны восходящих потоков, образуя над ней навес мощного радиоэха КЯ, направленный вправо от направления смещения облачной системы и вправо от направления перемещения КЯ;

- направление перемещения облачной системы (т. е. из распространения процесса облакообразования) отклоняется вправо от направления ведущего потока на угол  $5^{\circ} - 40^{\circ}$ ;

- скорость перемещения облачной системы в 2 – 2,5 раза меньше скорости ведущего потока, а КЯ отстают от него примерно в 1,5 раза и составляет 30 – 50 км/ч, достигая иногда 80 км/ч.

Упорядоченные многоячейковые градовые процессы образуются при умеренном и сильном ветре с умеренным сдвигом ( $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  при  $V_n \approx 40 - 100 \text{ км/ч}$ ), ограниченным одной плоскостью, т. е. ветер на всех высотах имеет почти одно направление, но нарастает с высотой. Наличие такого сдвига обуславливает указанную асимметричность КЯ.

### 1.4.3 Особенности строения и эволюции ГГП гибридного типа

Эти процессы можно отнести к классу хорошо организованных процессов, промежуточных между упорядоченными многоячейковыми и суперячейковыми. Эти процессы имеют три модификации (подтипа).

А) Первый подтип на стадиях развития и диссипации обычно состоит из 2-3 КЯ и имеет особенности упорядоченного многоячейкового процесса с относительно редким зарождением на правом фланге новых КЯ, а на втором этапе на стадии максимального развития отмечается достаточно длительное существование одной мощной КЯ, имеющей особенности структуры и динамики развития суперячейки. На третьем этапе суперячейка трансформируется в упорядоченный многоячейковый процесс. КЯ в нем, как и в случае упорядоченных многоячейковых процессов, не симметричны, имеют навес радиоэха, ориентированный вправо от направления перемещения на угол от  $0^{\circ}$  до  $40^{\circ}$ . Направление перемещения КЯ на стадии максимального развития отклоняется вправо от ведущего потока на  $0^{\circ} - 30^{\circ}$ .

Б) Второй подтип градовых процессов переходного типа состоит из нескольких периодически возникающих на правом фланге новых КЯ, но в отличие от упорядоченных многоячейковых процессов КЯ пространственно разнесены (их радиоэхо изолировано друг от друга). Структура и динамика развития отдельных КЯ при этом напоминает особенности небольших суперячеек с навесом радиоэха и квазинепрерывным обновлением во фронтальной правофланговой части.

В) Третья модификация на первом этапе имеет структуру и особенности суперячейки со значительным отклонением навеса радиоэха от направления перемещения вправо. В дальнейшем навес радиоэха постепенно разворачивается по направлению перемещения, а на наветренном фланге формируется новый навес радиоэха.

Два навеса радиоэха одновременно существуют в течение 10 – 20 минут, после чего старый навес исчезает. За время существования процесса может наблюдаться несколько таких циклов. Навес радиоэха формируется на наветренном фланге под углом  $90^0$  к направлению перемещения шторма, потом разворачивается до направления перемещения. В других случаях после появления двух зон питания суперячейки в области нового навеса радиоэха формируется новая ячейка, которая быстро усиливается и превращается в суперячейку, а старая оттесняется на подветренный фланг и диссипирует. После этого вновь наблюдается суперячейковый процесс.

Процессы переходного типа образуются в дни с большой конвективной неустойчивостью и повышенным влагосодержанием атмосферы, когда ветер одного направления нарастает с высотой, но в приземном слое имеет направление, отличное от ветра в среднем слое облакообразования.

#### **1.4.4 Особенности строения и эволюции суперячейковых ГП**

Суперячейковые процессы во всех регионах являются наиболее мощными и состоят из одной сверхмощной КЯ круговой или эллиптической формы (см. рис. 1.9 – 1.10) с характерными горизонтальными размерами 30 – 40 км и высотой 11 – 16 км. В течение одного дня в суперячейковом процессе на Северном Кавказе отмечаются обычно 2 или 3 суперячейковых облака, разнесенных во времени на 1-2 часа и в пространстве на 50 – 70 км [77].

Формированию суперячеек предшествует облачная система из нескольких КЯ или фронтальная полоса грозových очагов, распадающихся по мере развития суперячейки, и к моменту ее максимального развития в радиусе нескольких десятков километров других КЯ не наблюдается. При этом суперячейка формируется из новой КЯ, зарождающейся на правом фланге и несколько впереди облачной системы. Через 10 – 15 минут после зарождения суперячейка имеет хорошо организованную характерную структуру и в дальнейшем

длительное время сохраняет свои характеристики.

Ставропольская ВС, Ставрополь, RUST  
Карта воздействия 1 (10 см)

АСУ-МРЛ 2008  
2009-06-04 18-37-46

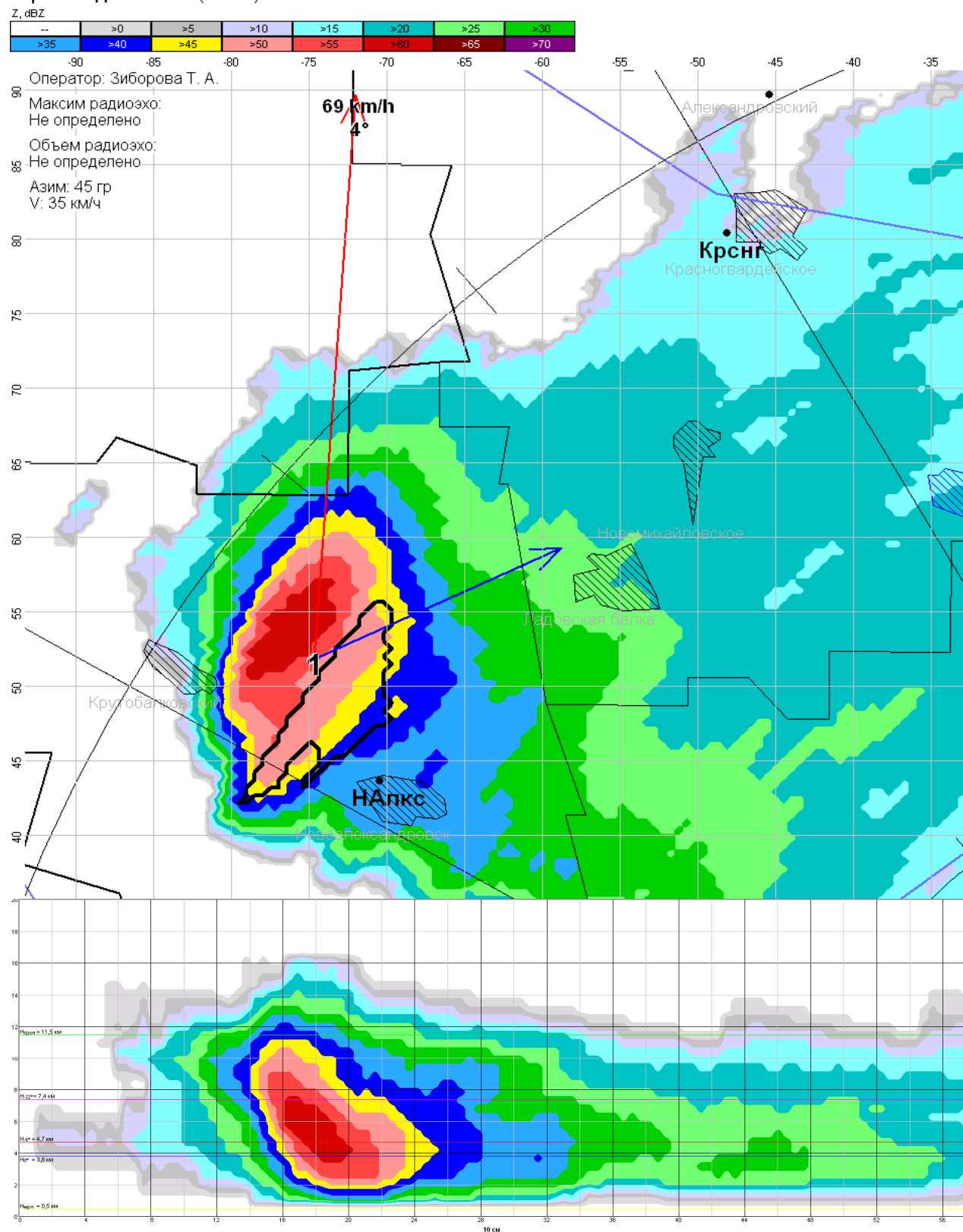


Рис. 1.9- Суперячейковое градовое облако с левосторонним развитием

Ставропольская ВС, Ставрополь, RUST  
Карта воздействия 1 (10 см)

АСУ-МРЛ 2008  
2008-07-26 17-53-05

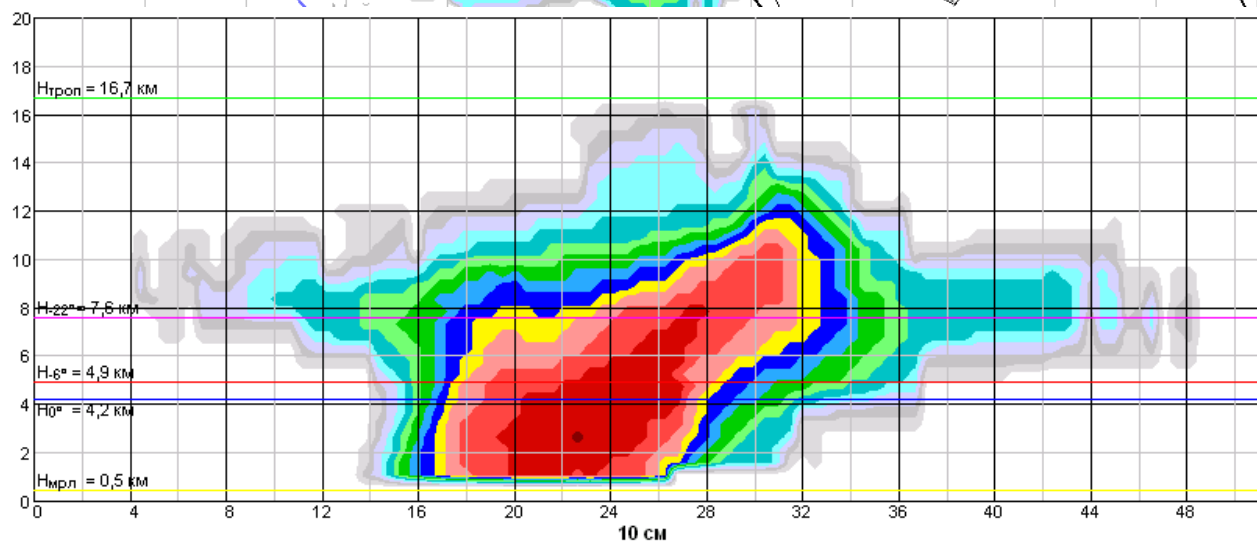
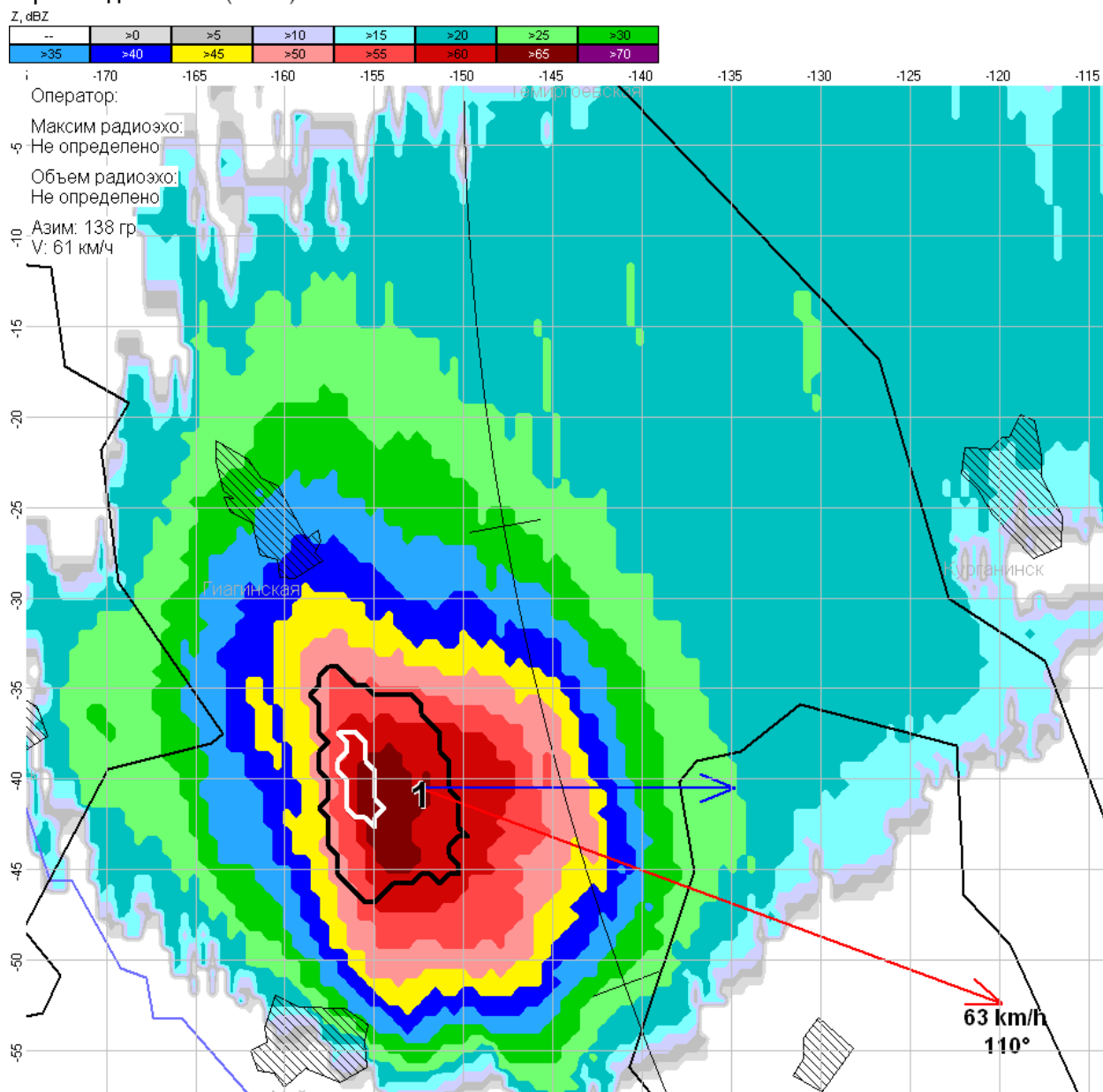


Рис. 1.10 – Суперячейковое градовое облако с правосторонним развитием, наблюдавшееся в Ставропольском крае 26.07.2008 в 17:53

Характерной особенностью суперячеек, как следует из рис. 1.6, является наличие на правом наветренном фланге протяженной (5 – 15 км) зоны мощного восходящего потока со скоростью  $W = 20 - 50$  м/с, проникающей до высоты 10 – 15 км над уровнем моря. Область восходящих потоков может увеличиваться или уменьшаться в диаметре или по высоте, но продолжительное время не рассеивается. Градовый очаг и зона повышенного радиоэха в суперячейке сдвинуты на наветренную сторону, располагаются на стыке с зоной мощных восходящих потоков и частично накрывает зону восходящего потока.

Суперячейковый процесс в стадии квазистационарного состояния перемещается почти прямолинейно под углом  $10^0 - 90^0$  вправо от ведущего потока, не изменяя своих характеристик, и имеет продолжительность жизни от одного до нескольких часов.

Суперячейковые процессы образуются обычно при прохождении фронтов окклюзии по типу холодного в дни с умеренной и сильной конвективной неустойчивостью, высоким влагосодержанием атмосферы (особенно в приземном слое, где формируется восходящий поток) со средним и сильным сдвигом ветра (обычно ЮЗ), не изменяющего направления в среднем и верхнем слое облакообразования, а в нижнем слое имеющего с высотой правый поворот примерно на  $90^0$  (с юго-западного на юго-восточный).

Обновление во фронтальной части происходит дискретно за счет развития с периодичностью 2 – 5 мин фидерных облаков, первое радиоэхо которых возникает впереди навеса радиоэха на фронтальной правофланговой границе радиоэха основного облака и сливается с ним [19].

### 1.5 Анализ состояния обработки данных грозопеленгационной сети на Северном Кавказе

Сеть грозорегистрации на базе системы LS8000, установленная на Северном Кавказе в 2008 году, состоит из восьми грозопеленгаторов (датчиков) и центрального пункта приема и обработки информации [29]. Координаты местоположений грозопеленгаторов и центрального пункта приведены в таблице 1.

Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Низкочастотный датчик LF фиксирует, в основном, молниевые разряды типа «облако-земля». Высокочастотный датчик VHF фиксирует молниевые разряды только типа «облако-облако» и внутриоблачные [29].

Зоны обзора для разных типов молниевых разрядов различные. Для молниевых разрядов «облако-земля» радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов «облако-облако» – 325 км. Зона обзора грозопеленгационной сети приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, зона обзора перекрывает территории юга европейской части России и республик Закавказья.

Таблица 1. Координаты местоположений грозопеленгаторов и центрального пункта.

Место расположения	Координаты		
	Широта	Долгота	Высота, м
Черкесск	44,2874 °	42,2404 °	901
Зеленокумск	44,4337 °	43,9036 °	172
Ставрополь	45,1136 °	42,1012 °	483
Кызбурун	43,6787 °	43,4048 °	747
Пуличев	48,1 103 °	41,1489 °	113
Весёлый	47,7238 °	40,0822 °	145
Подгоренская	47,5595 °	42,3670 °	87

Комаров	47,279 7 °	41,2740 °	58
Центральный пункт (ВГИ), г. Нальчик	43,4694 °	43,5861 °	540

По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральные процессоры (CP8000), расположенные в центрах приема и обработки информации, выдают до 25 параметров по каждому молниевому разряду. Основные параметры следующие: для молниевых разрядов Облако-Земля:

- Дата и время с точностью до 100 наносекунд.
- Широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда).
- Сила и полярность сигнала (тока в канале разряда), в кА.
- Классификация разрядов на положительные и отрицательные.
- Время роста сигнала до пикового значения, в мкс.
- Время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.

для молниевых разрядов Облако-Облако и внутриоблачные:

- Дата и время с точностью до 100 наносекунд.
- Широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда).

Благодаря таким инструментальным измерениям можно достаточно точно определять:

- начало, окончание и продолжительность грозовых явлений на юге европейской части России, а также динамику их развития и траекторию перемещения;
- пространственное местоположение разрядов молний, их классификация по типам и полярностям (знак переносимого молнией на землю электрического заряда);
- значения амплитуды токов в каналах наземных разрядов молний и временные характеристики нарастания и спада импульсов токов [27].

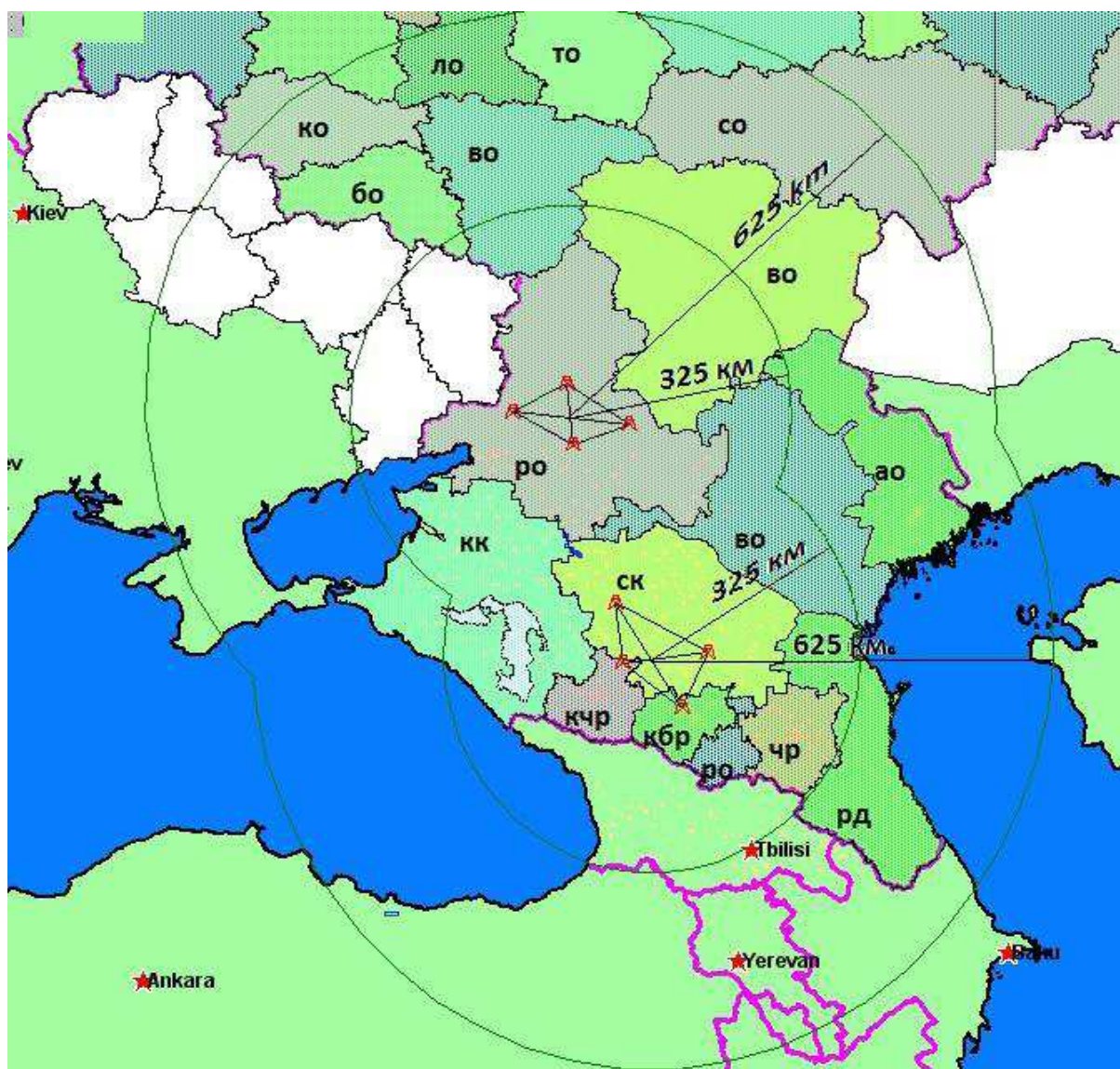


Рис. 1.11 – Зона обзора грозопеленгационной сети LS8000 [29]

Система позволяет осуществлять автоматическую регистрацию грозовых разрядов, их архивирование и визуализацию информации в различных форматах: в виде табличных данных, в виде точек координат молний, наложенных на карты местности (рис. 1.11), в виде цветовой индикации на различных картосхемах и др. [29-31].

Для отображения данных о молниевых разрядах на карте местности в состав грозопеленгационной сети LS 8000 входит программное приложение LTS-2005, которое позволяет отображать грозовые разряды в режиме реального времени (рис. 1.12). Цвета на картах указывают на временной диапазон, в течение которого произошли разряды. Красный цвет отображает разряды,

произошедшие в последние 30 минут. Знаки «+» и «-» показывают полярности молниевых разрядов.

Методика измерений напряженности электрического поля атмосферы и состав аппаратуры выбирались с учетом возможности их работы без обслуживания длительное время, что позволяет собрать за короткий период времени достаточное количество измерений.

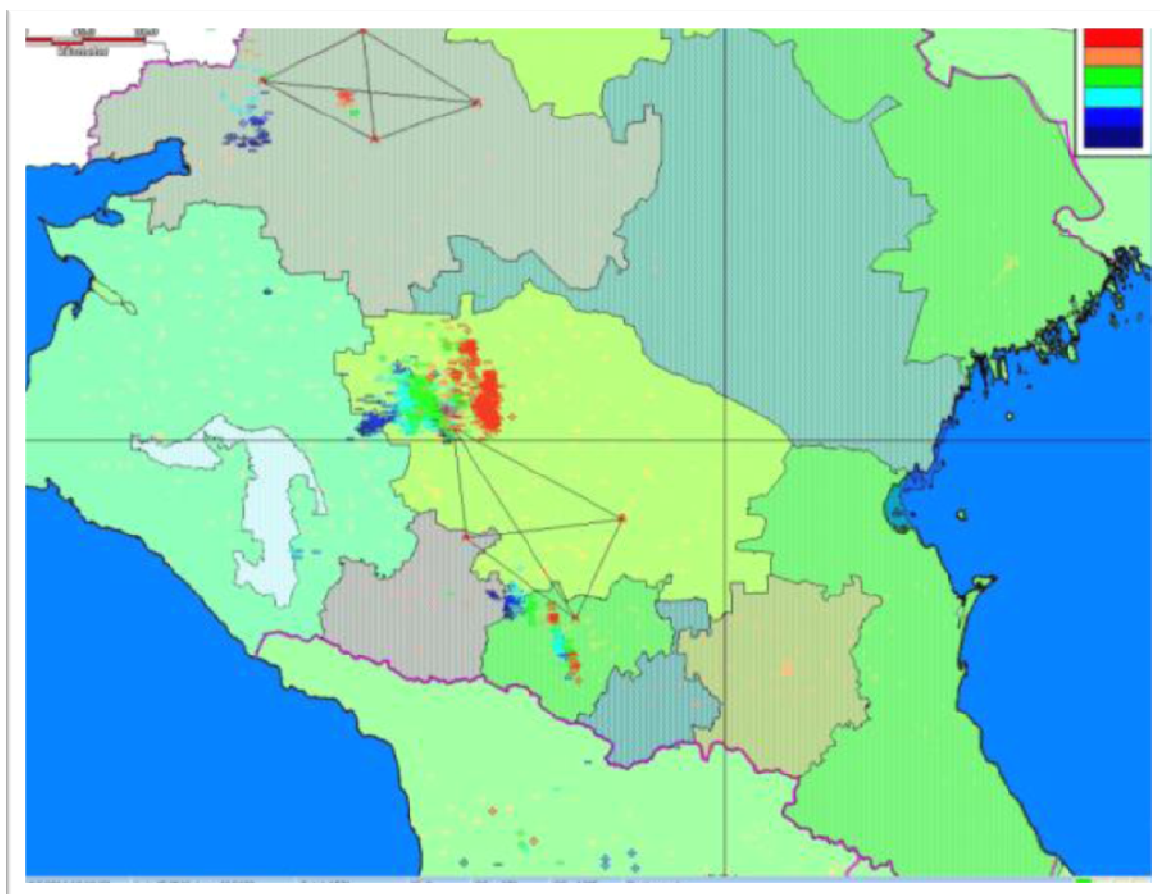


Рис. 1.12 – Пример отображения грозового процесса на карте местности

Обозначения:

«+» – разряды «облако-земля» положительной полярности; «-» – разряды «облако-земля» отрицательной полярности; О – межоблачные и внутриоблачные разряды; – местоположение датчиков грозопеленгационной сети.

## ВЫВОДЫ

В результате обзора научной литературы по вопросу исследований установлено следующее:

1. Поскольку кучево-дождевая (и даже слоистообразная) облачность имеют ячейковую структуру, для распознавания явлений погоды для целей штормооповещения и активных воздействий на облачные процессы необходимы методы и алгоритмы идентификации конвективных ячеек, в каждой из которых могут отмечаться те или иные явления погоды.

2. Существующие системы обработки радиолокационной информации обеспечивают получение, обработку и представление радиолокационной информации об облаках и осадках, однако не предусматривают комплексного решения вопросов автоматической идентификации КЯ, измерения их координат и комплекса параметров, определения тенденции развития и распознавания явлений погоды в каждой КЯ.

3. Применяемые в России критерии распознавания были разработаны по данным неавтоматизированных МРЛ на основе ручных измерений одномерных параметров облаков (максимальной отражаемости в нескольких слоях, высоты верхней границы радиоэха и других геометрических характеристик). Эти критерии до сих пор используются и в автоматизированных МРЛ в сети штормооповещения, что обеспечивает распознавание явлений погоды с оправдываемостью около 92% – 95 %. Однако такая оправдываемость обычно достигается в результате анализа радиолокационных данных опытным специалистом, отсекающим ложные грозы, связанные с аномальной рефракцией, необнаруженные грозы, связанные с ослаблением радиоволн в осадках, углами закрытия и т.д. Это лишает возможности полной автоматизации получения и распространения информации, снижает оперативность оповещения.

4. Информация грозопеленгационной сети и сети метеостанций и постов, в противоградовых службах и сети штормооповещения, имеет большой нереализованный потенциал.

## Глава 2

### МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ И АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Метеообеспечение авиации, штормовое оповещение населенных пунктов, активные воздействия на облачные системы с целью предотвращения градобитий и искусственного увеличения осадков требуют решения проблемы надежной локализации КЯ в облачной системе, оценки степени грозоопасности и градоопасности каждой КЯ, возможности формирования ливневых паводков, определения направления и скорости их перемещения [12].

В автоматизированных системах «Titan» и «WDSS-II», используемых в США и ряде других стран, обеспечивается идентификация штормовых ячеек, построение траекторий их перемещения в целях оповещения об опасных явлениях погоды, но не предусмотрены распознавания и нумерация всех КЯ, а также подпрограммы измерения объемных характеристик КЯ, управления воздействием на облачные процессы [259].

Конвективная ячейка в облачной системе, согласно [16], 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.

#### 2.1 Локализация облаков и конвективных ячеек

Метод автоматической идентификации облаков состоит из:

- распознавания и идентификации облаков, измерения их координат и комплекса одномерных, двумерных и трехмерных параметров;

- построения графиков временного хода параметров;
- определения тенденции развития КЯ;
- определения направления и скорости перемещения КЯ;
- распознавания явлений погоды в каждой КЯ, включая оценку их грозо- и градоопасности;
- распознавания категорий объектов воздействия для целей активного воздействия на градовые процессы.

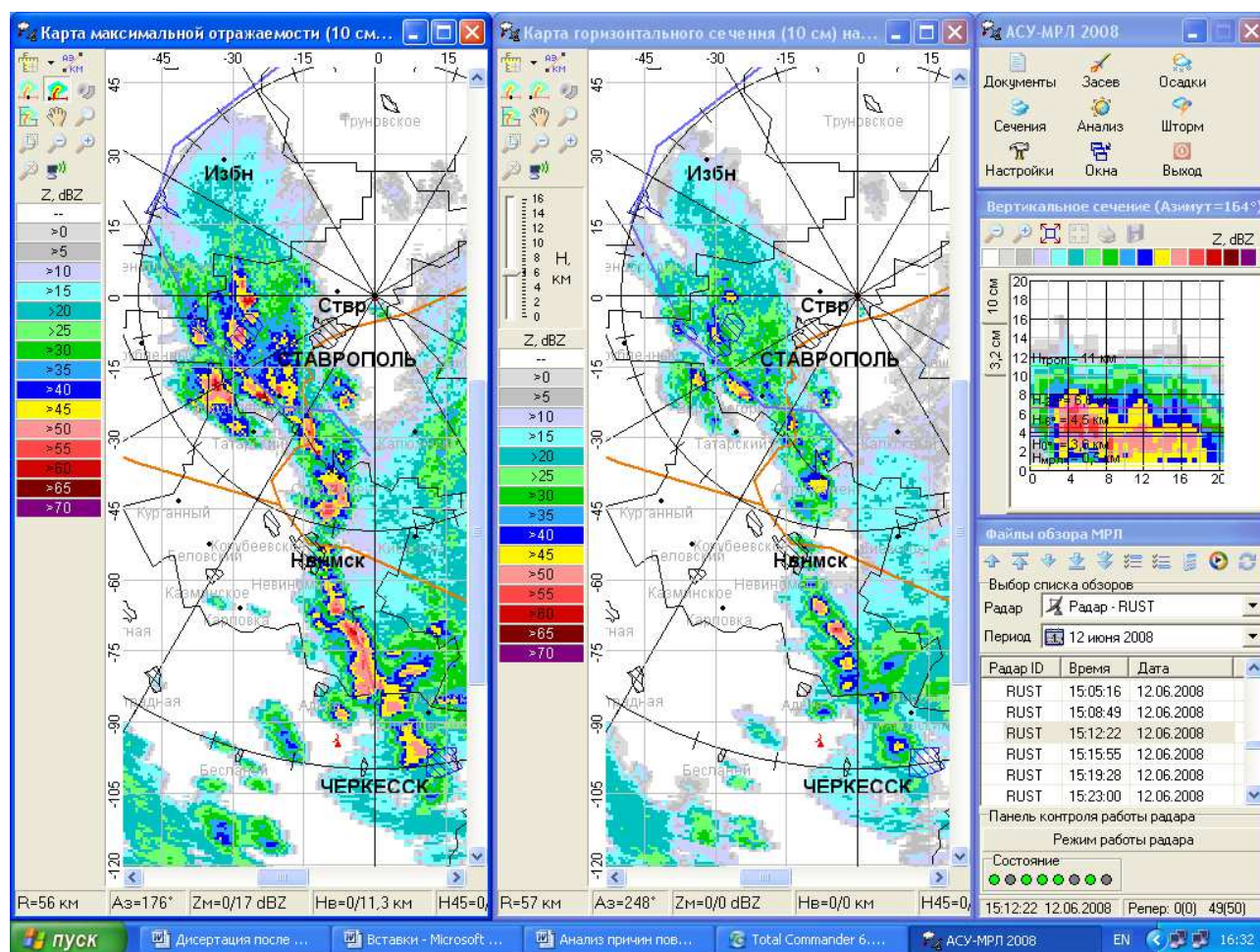


Рис. 2.1 – Пример карты максимальной отражаемости облачной системы (слева) и карты горизонтального сечения на высоте 6 км над уровнем моря (справа)

Сложность этой задачи заключается в том, что кучево-дождевые облачные системы обычно состоят из множества КЯ, имеющих различную пространственную структуру, непрерывно меняющуюся во времени, перемещающихся в разных направлениях с разной скоростью [48,93,97]. Как видно из рис. 2.1, облачная система может состоять из множества КЯ,

большинство которых на карте максимальной отражаемости выглядят как опасные, и только детальный анализ показывает, что одни из них находятся в стадии развития, другие в стадии диссипации, и только некоторые представляют градовую или грозовую опасность. В правой части рис. 2.1 показана та же облачность в виде карты горизонтального сечения на высоте 6 км, на которой видно, что из более 20 КЯ, кажущихся опасными на карте максимального отражения, градовую опасность представляют только 4-5 КЯ. Более углубленный анализ каждой ячейки существенно повышает надежность оценки явлений погоды в них.

## **2.2 Метод и алгоритмы идентификации облаков**

Задача распознавания КЯ по существу является задачей распознавания образов и анализа сцен [49,97].

Учитывая сложность задачи идентификации КЯ в облачной системе, измерения их параметров, оценки степени грозо- и градоопасности, на основе комбинации методов распознавания образов, иерархического кластерного анализа и метода ближнего соседа [97] нами была реализована новая методика, заключающаяся в следующем [21]:

- выделение в поле радиоэха облачности точек, ограничивающих замкнутые изолинии радиолокационной отражаемости  $Z$ ;
- упорядочение полученных точек для получения составных частей КЯ;
- объединение составных частей КЯ в единые поля замкнутых изолиний отражаемости;
- выделение в поле радиоэха вершин, ограниченных замкнутыми изолиниями  $Z$ ;
- идентификация КЯ и их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения;
- измерение комплекса одномерных, двумерных и трехмерных параметров КЯ;
- построение графиков временного хода комплекса параметров КЯ;

- расчет направления и скорости перемещения КЯ;
- оценка степени грозовой и градовой опасности КЯ, распознавание категорий объектов воздействия (ОВ);
- документирование параметров КЯ и графиков их временного хода [104].

Решение поставленной задачи осуществляется путем обработки трехмерных полей радиолокационных сигналов, получаемых с помощью АМРК «АСУ-МРЛ», программное обеспечение и аппаратная часть которого позволяет получить с цикличностью 3,5 мин объемный файл обзора [8], 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, радиальная дальность).

Радиолокационной отражаемостью облаков называют суммарное поперечное сечение обратного рассеяния всех частиц, находящихся в единице облачного объема [48,50,51], которое рассчитывают по формуле

$$\eta = \sum_{i=1}^n n_i \sigma_i \text{ см}^{-1}, \quad (2.1)$$

где  $\eta$  - радиолокационная отражаемость, выраженная в  $\text{см}^{-1}$  ( $\text{см}^2/\text{см}^3$ );  $n_i$  - концентрация рассеивающих частиц, имеющих поперечное сечение обратного рассеяния  $\sigma_i$ .

В случае рассеяния радиоволн на оптически «мягких» сферических частицах диаметром  $d \ll \lambda$ , для которых выполняется условие  $m \frac{\pi d}{\lambda} \leq 0,13$  (где  $m$  – комплексный показатель преломления вещества частицы), выражение для  $\eta$  достаточно простое:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \sum_{i=1}^n N_i d_i^6, \quad (2.2)$$

где величина  $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$  в случае капель дождя в диапазоне  $2 < \lambda < 10$  см равна 0,93, а в случае ледяных частиц почти не зависит от  $\lambda$  и равна 0,19.

В области крупных частиц ( $d \approx \lambda$ ) выражение (2.2) не выполняется и значения  $\sigma_i$  в формуле (2.1) рассчитываются по сложным дифракционным формулам [50,51,83].

В мировой практике радиолокационной отражаемостью принято называть величину  $Z = 10 \lg Z_d$  (dBZ), где  $Z_d = \sum_{i=1}^{\infty} N_i d_i^6$  является множителем радиолокационной отражаемости  $\eta$  и связано с ним выражением [249]:

$$Z_d = 3,52 \cdot 10^9 \lambda^4 \eta \text{ мм}^6/\text{м}^3. \quad (2.3)$$

Радиолокатор МРЛ-5, данные которого применялись в нашем анализе, работает на двух длинах волн ( $\lambda_1 = 3,2$  и 10 см) каналов, радиолокационная отражаемость  $Z$  на которых рассчитывается по формулам [19]:

$$Z_{3,2n} = 115,3 + N_{3,2n} + \Delta N_{3,2авк} + 2k_R + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (k_r + k_{oc} + k_o) \Delta R + 20 \lg R_n - 10 \lg C_{3,2}, \text{ dBZ}, \quad (2.4)$$

$$Z_{10n} = 135,7 + N_{10n} + \Delta N_{10авк} + 2k_R + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (k_r + k_{oc} + k_o) \Delta R + 20 \lg R_n - 10 \lg C_{10}, \text{ dBZ}, \quad (2.5)$$

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 мощности радиоэха на изменение потенциала МРЛ-5 по данным автокалибровки (dB);

$k_R$  – ослабление в ветрозащитном укрытии (Radom) антенны (dB), при его обволакивании пленкой воды выпадающих осадков, рассчитываемое по формуле [19]

$$k_R = 0,042J + 0,74 \quad (2.6)$$

$J$  – интенсивность осадков над ветрозащитным укрытием.

$k_r$  – коэффициенты ослабления (dB/км) в газах атмосферы, рассчитываемые по формулам

$$- \text{ для } \lambda = 10 \text{ см: } k_{10\Gamma} = \left( 0,4 + 3,45e^{\frac{\alpha}{1,8}} \right) \left( 1 - e^{-R/[27,8+154e^{\frac{\alpha}{2,2}}]} \right); \quad (2.7)$$

$$- \text{ для } \lambda = 3,2 \text{ см: } k_{3,2\Gamma} = 1,722 \left\{ \left( 0,4 + 3,45e^{\frac{\alpha}{1,8}} \right) \left( 1 - e^{-R/[27,8+154e^{\frac{\alpha}{2,2}}]} \right) \right\}. \quad (2.8)$$

где  $\alpha$ - угол зондирования.  $R$ -дальность.

$k_0$  и  $k_{oc}$  – коэффициенты ослабления (дБ/км) в газах атмосферы, облаках и осадках, соответственно, рассчитываемые по формулам [19]

$$k_{3,2n} = 10^{0,062Z3,2n - 3,32} \text{ дБ/км}; \quad (2.9)$$

$$k_{10n} = 10^{0,063Z10n - 3,32} \text{ дБ/км}; \quad (2.10)$$

где  $10\lg C_{3,2}$  и  $10\lg C_{10}$  – константы 3,2 и 10 см каналов МРЛ-5.

В результате радиолокационного обзора и расчета значений радиолокационной отражаемости  $Z$  обеспечивается получение объемного файла обзора, содержащего значения  $Z$  по 360 секторам азимута, 400 каналам дальности и 18 (24) углам возвышения.

Далее мы разбиваем все пространство радиолокационного обзора на элементарные объемы  $0,125 \text{ км}^3$  и, используя метод линейной интерполяции, рассчитываются значения  $Z$  во всех точках пространства с координатами  $x, y, z$ . Следовательно, область радиолокационного обзора можно представить как набор горизонтальных сечений – матрицей  $800 \times 800$  через каждые 500 м высоты над уровнем расположения МРЛ. Алгоритм построения горизонтальных сечений на высоте  $z$  заключается в переборе всех значений  $x$  и  $y$  и нахождении для них значений  $\alpha, Az, R$ , относящихся к заданной высоте:

$$\begin{aligned} Az &= \arctg \frac{y}{x}, \\ R_{xy} &= \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \alpha &= \arctg \frac{z}{R_{xy}}, \\ R_{xyz} &= \sqrt{R_{xy}^2 + z^2}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

По найденным значениям  $\alpha, Az$  и  $R$  находим 8 ближайших точек из цикла радиолокационного обзора:

$$\begin{aligned}
&(\alpha_1, Az_1, R_1), (\alpha_1, Az_1, R_2), \\
&(\alpha_1, Az_2, R_1), (\alpha_1, Az_2, R_2), \\
&(\alpha_2, Az_1, R_1), (\alpha_2, Az_1, R_2), \\
&(\alpha_2, Az_2, R_1), (\alpha_2, Az_2, R_2), .
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

далее осуществляется преобразование координат из сферических в декартовы:

$$\begin{aligned}
z_1 &= R_1 * \sin(Q1), \\
x_1 &= R_1 * \cos(Q1) * \cos(Az_1), \\
y_1 &= R_1 * \cos(Q1) * \sin(Az_1),
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

И находится расстояние до рассчитываемой нами точки:

$$r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \tag{2.14}$$

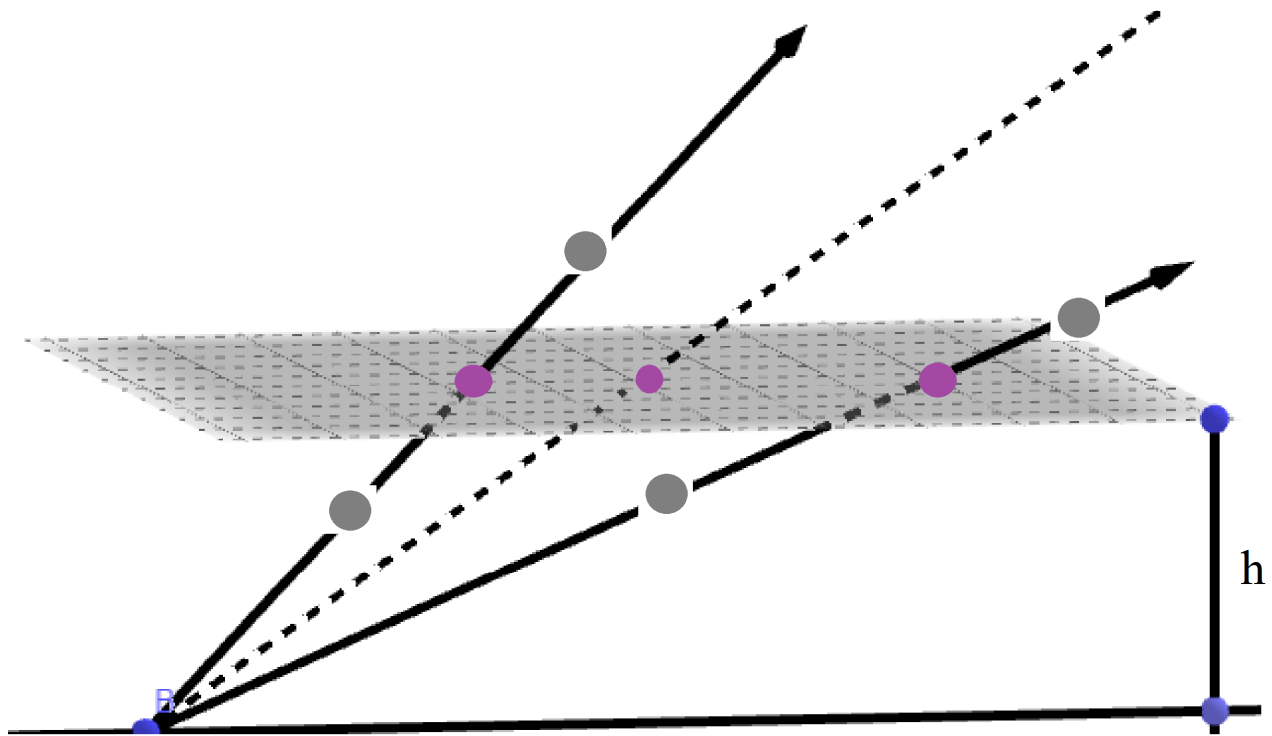


Рис. 2.2 – Построение горизонтального сечения

В общем случае имеем набор конусов (рис. 2.2), где

- $\alpha_i$  – максимальный угол места «луча», меньший угла места искомой точки;
- $\Delta\alpha_i$  – шаг по углу места известен;

- $r_k$  – расстояние до  $k$ -той ячейки;
- $\Delta r$  – шаг по расстоянию, известен;
- $d\alpha_i$  – превышение угла места к искомой точке над  $\alpha$ ;
- $dr_k$  – превышение расстояния до искомой точки над  $L$ .

При получении различных карт для нахождения значений отражаемости в произвольной точке вне узлов сетки используется уравнение линейной интерполяции (см. рис. 2.3.):

$$Z = Z_1 + (Z_2 - Z_1) \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \quad (2.15)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – значения отражаемости в некоторых соседних точках сетки  $P_1$  и  $P_2$  соответственно;  $Z$  – значение отражаемости в некоторой точке  $P$  между ними;  $r_1$  и  $r_2$  – расстояние от точки  $P$  до точек  $P_1$  и  $P_2$ , соответственно.

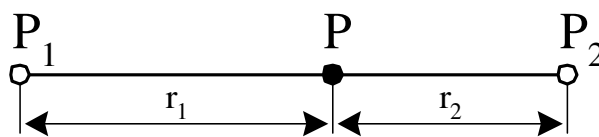


Рис. 2.3 – Расчет отражаемости по весовым коэффициентам

Значения отражаемости внутри сегмента  $(\Delta\alpha; \Delta r)$  можно представить (см. рис. 2.4) в виде некоторой функции  $f(\alpha, r)$ , проходящей через точки  $P_{i,j,k}$ ,  $P_{i+1,j,k}$ ,  $P_{i,j,k+1}$ ,  $P_{i+1,j,k+1}$ . Значение в точке  $P'$  находим при помощи двухшаговой линейной интерполяции [66,86]:

$$\begin{aligned} Z_{i',j,k} &= Z_{i,j,k} + (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \frac{d\alpha_i}{\Delta\alpha}, \\ Z_{i',j,k+1} &= Z_{i,j,k+1} + (Z_{i+1,j,k+1} - Z_{i,j,k+1}) \frac{d\alpha_i}{\Delta\alpha}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$Z'_{j,m} = Z_{i',j,k} + (Z_{i',j,k+1} - Z_{i',j,k}) \frac{dr_k}{\Delta r}, \quad (2.17)$$

или

$$Z_{i,j,k'} = Z_{i,j,k} + (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \frac{dr_k}{\Delta r},$$

$$Z_{i+1,j,k'} = Z_{i+1,j,k} + (Z_{i+1,j,k+1} - Z_{i+1,j,k}) \frac{dr_k}{\Delta r},$$
(2.18)

$$Z'_{j,m} = Z_{i,j,k'} + (Z_{i+1,j,k'} - Z_{i,j,k'}) \frac{d\alpha_i}{\Delta \alpha}.$$
(2.19)

Подставляя (2.16) в (2.17) или (2.18) в (2.19) получим

$$Z'_{j,m} = Z_{i,j,k} + (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \frac{dr_k}{\Delta r} + (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \frac{d\alpha_i}{\Delta \alpha} +$$

$$+ (Z_{i,j,k} + Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k+1} - Z_{i+1,j,k+1}) \frac{dr_k}{\Delta r} \frac{d\alpha_i}{\Delta \alpha}.$$
(2.20)

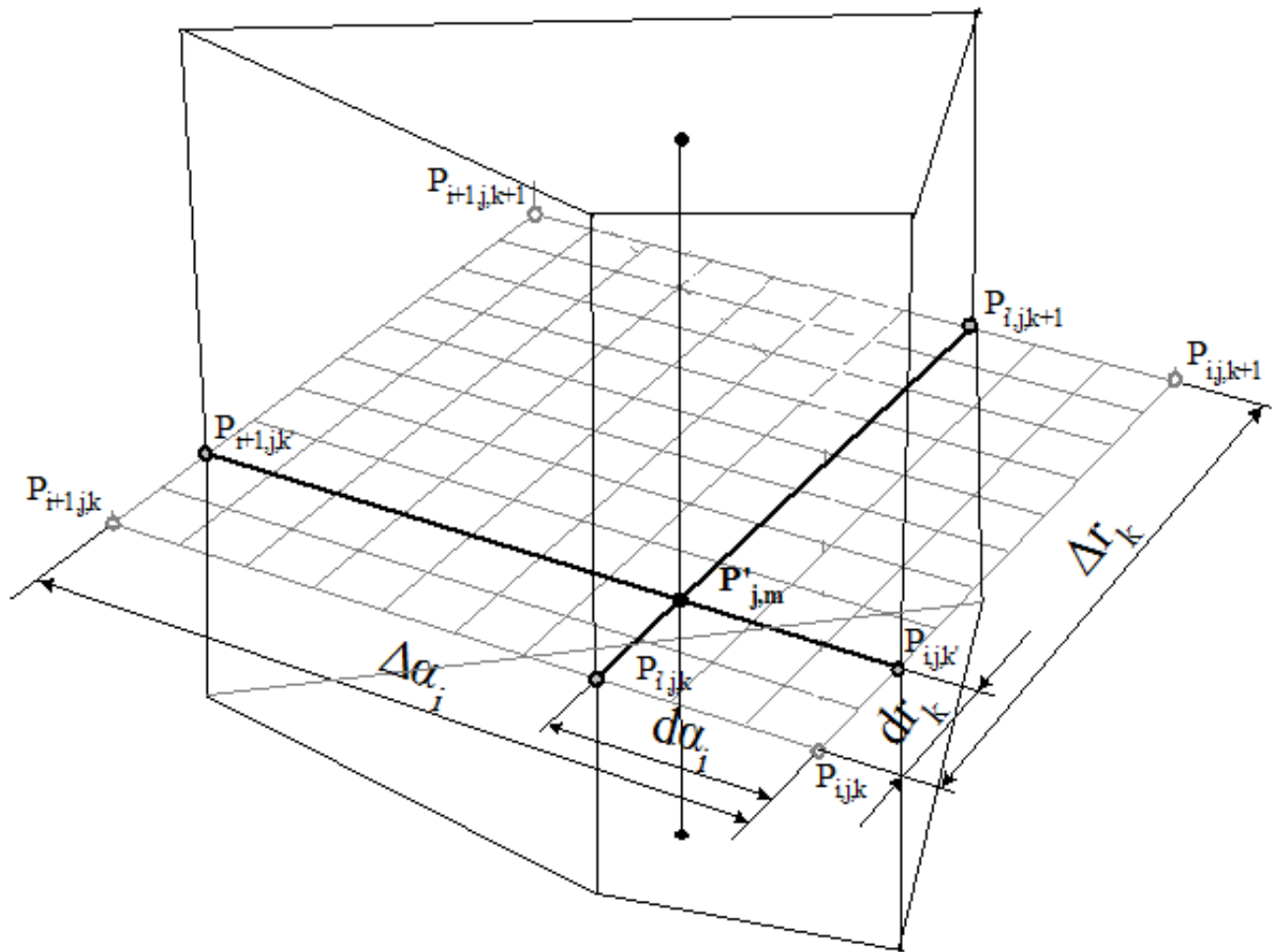


Рис. 2.4 Нахождение значения отражаемости в произвольно заданной точке

Алгоритм построения горизонтальных сечений на высоте  $h$  заключается в переборе точек сечения, точнее, в переборе всех значений  $j$  и  $m$  и нахождении для них значений  $i, k, d\alpha_i, dr_k$  для дальнейшей подстановки в формулу (2.20):

$$r_k^* = \sqrt{h^2 + r_m^2}, \quad k = \left\lceil \frac{r_k^*}{\Delta r} \right\rceil, \quad r_k = k \cdot \Delta r, \quad dr_k = r_k^* - r_k, \quad (2.21)$$

$$\alpha_i^* = \arctg \frac{h}{\bar{r}_k}, \quad i = \max_{\alpha_i < \alpha_i^*} i, \quad d\alpha_i = \alpha_i^* - \alpha_i,$$

где  $r_k^*$  и  $\alpha_i^*$  – наклонная дальность и угол места искомой точки относительно радиолокатора, соответственно.

Карта максимальной отражаемости представляет собой проекцию максимальных значений горизонтальных сечений на ось  $XU$ . Задача получения карты максимальной отражаемости сводится к задаче нахождения максимальных значений  $Z$  в каждом столбе сетки в цилиндрической системе координат (см. рис. 2.5):

$$Z_{j,m}^{\max} = \max_{i=1..n} Z_{i,j,m}^*, \quad (2.22)$$

где  $Z_{i,j,m}^*$  – значение отражаемости в точке пересечения луча  $(\alpha_i; \beta_j)$  с вертикальной прямой, проходящей через точку с координатами  $(0, \beta_j, r_m)$ .

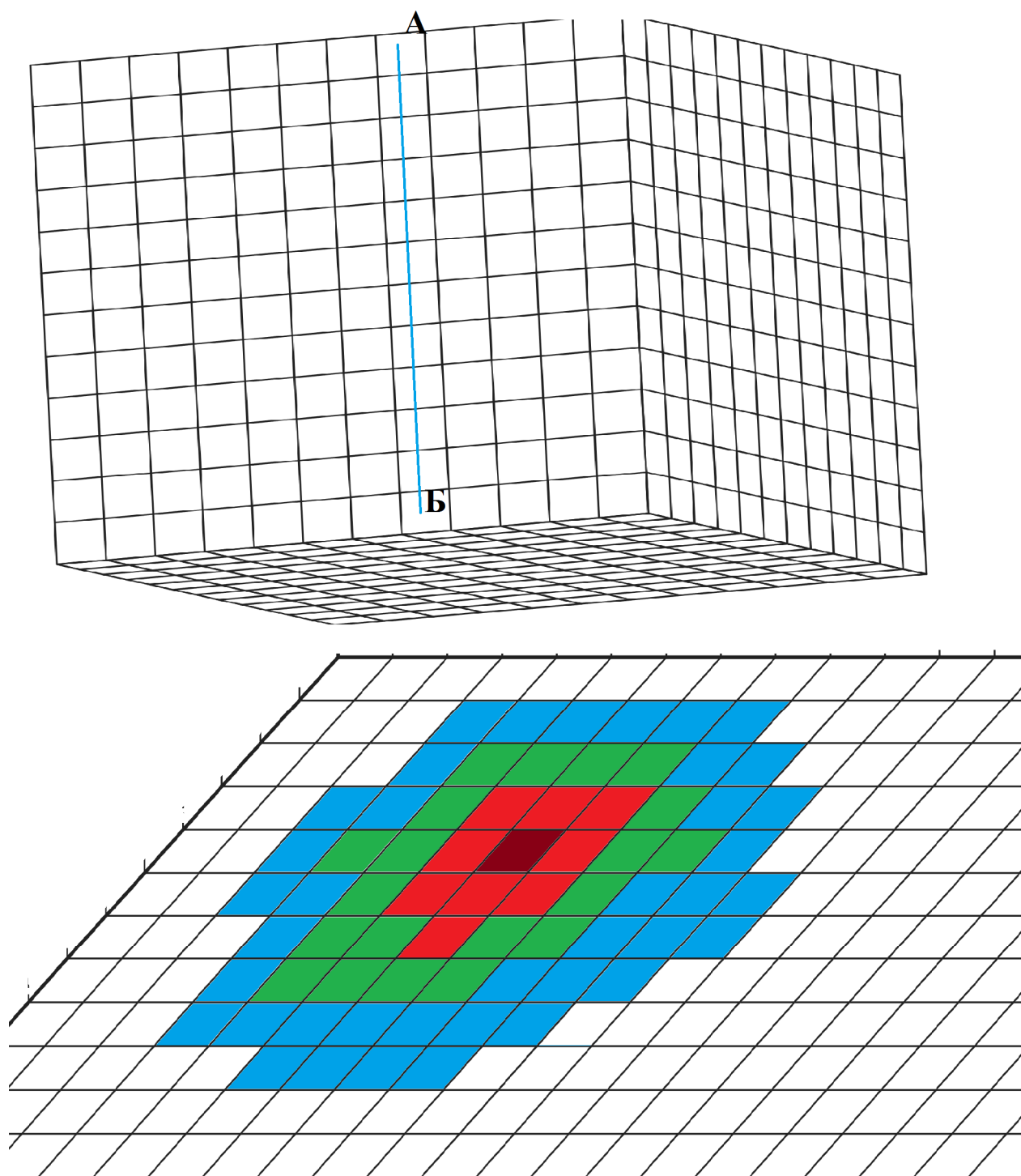


Рис. 2.5 Схема определения максимальной отражаемости

В результате этого мы будем иметь матрицу  $800 \times 800$  ячеек, содержащую в себе значения отражаемостей пространства на площади  $160000 \text{ км}^2$  с элементарными площадями по  $500 \times 500 \text{ м}^2$ .

Суть предлагаемого метода идентификации КЯ заключается в:

- преобразовании полярных координат полученных сигналов в декартовы;

- пересчете мощности радиоэха в отражаемость  $Z$  (по калибровочным данным);
- формировании матрицы данных об отражаемости  $Z$  во всех точках виртуального пространства  $x, y, z$  размером  $400 \times 400 \times 20$  км, содержащую псевдогоризонтальные сечения на 40 уровнях высот;
- построении карты максимальной отражаемости;
- последовательном сканировании точек виртуального пространства по  $x, y$  и  $z$  с шагом 0,5 км с целью выделения границ КЯ (западной, восточной, северной и южной), 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 (см. рис. 2.6). Хотя в одной строке пары точек одной КЯ могут быть перемешаны с парами точек другой КЯ, составные части каждой КЯ восстанавливаются следующим образом:

а) полученные при переборе первые две точки, соответствующие южному краю первой подъячейки КЯ № 1, имеющие координаты  $x_{31}, x_{31}, x_{B1}, x_{B1}$ , где индексы «З» 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 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 подъячейки, либо с новой подъячейкой. Таким образом, можно получить набор пар точек, составляющих подъячейку, в последовательности с юга на север и с запада на восток.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3	4	3	3	2	2	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	2	2	1	0	0
0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	2	2	1	0
0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2.6 Этапы выделения первого, второго и третьего контуров КЯ

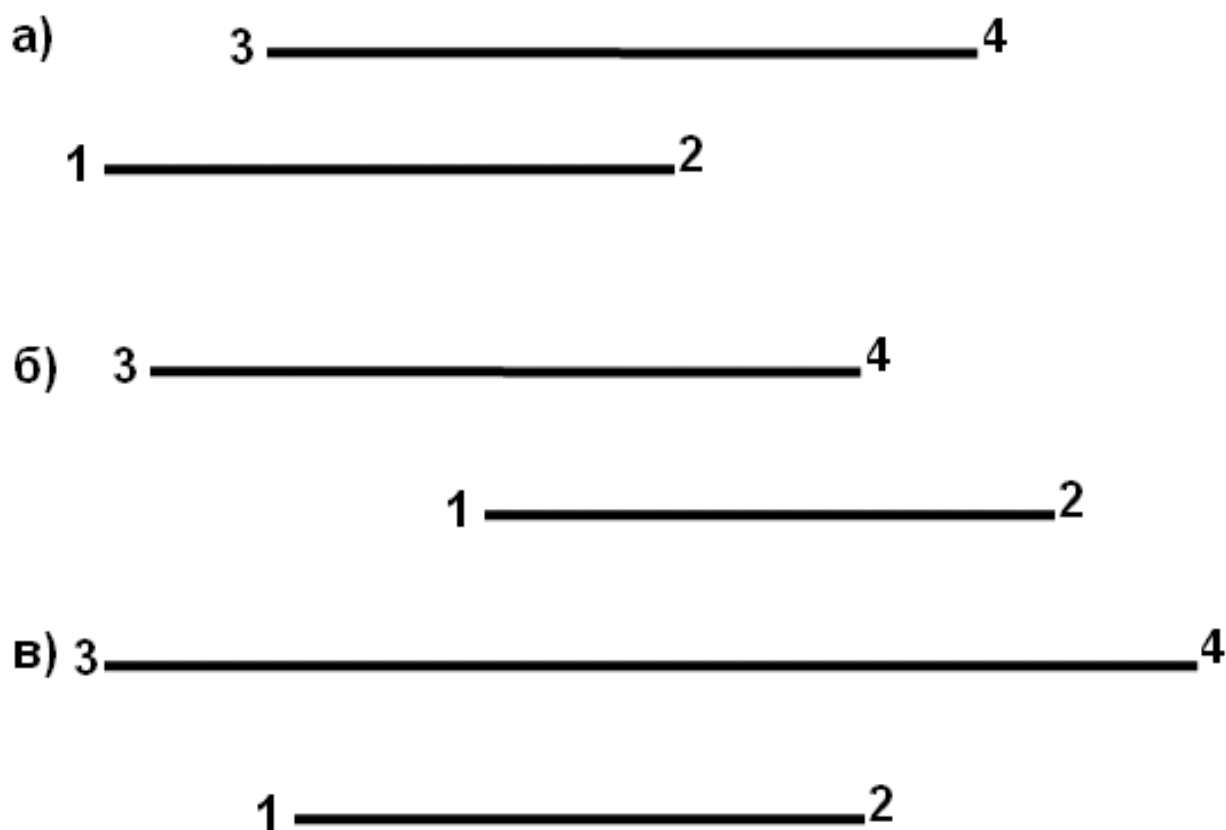


Рис. 2.7 Порядок нахождения парных краевых точек КЯ

На следующем этапе необходимо упорядочить точки, ограничивающие подъячейку, так как на первом этапе получена не последовательность точек, а набор пар точек. Зная количество пар точек, входящих в подъячейку, можно их разделить на западные и восточные границы подъячеек и расставить по порядку. В результате этого выделяется контур подъячейки.

Для объединения подъячеек в единую ячейку необходимо сравнить северные и южные пары точек всех подъячеек со всеми параллельными точками текущей подъячейки на предмет принадлежности пар подъячеек одной КЯ и объединить каждый контур сплошными линиями, имеющими цвет в соответствии с принятой палитрой цветов отображения полей отражаемости Z.

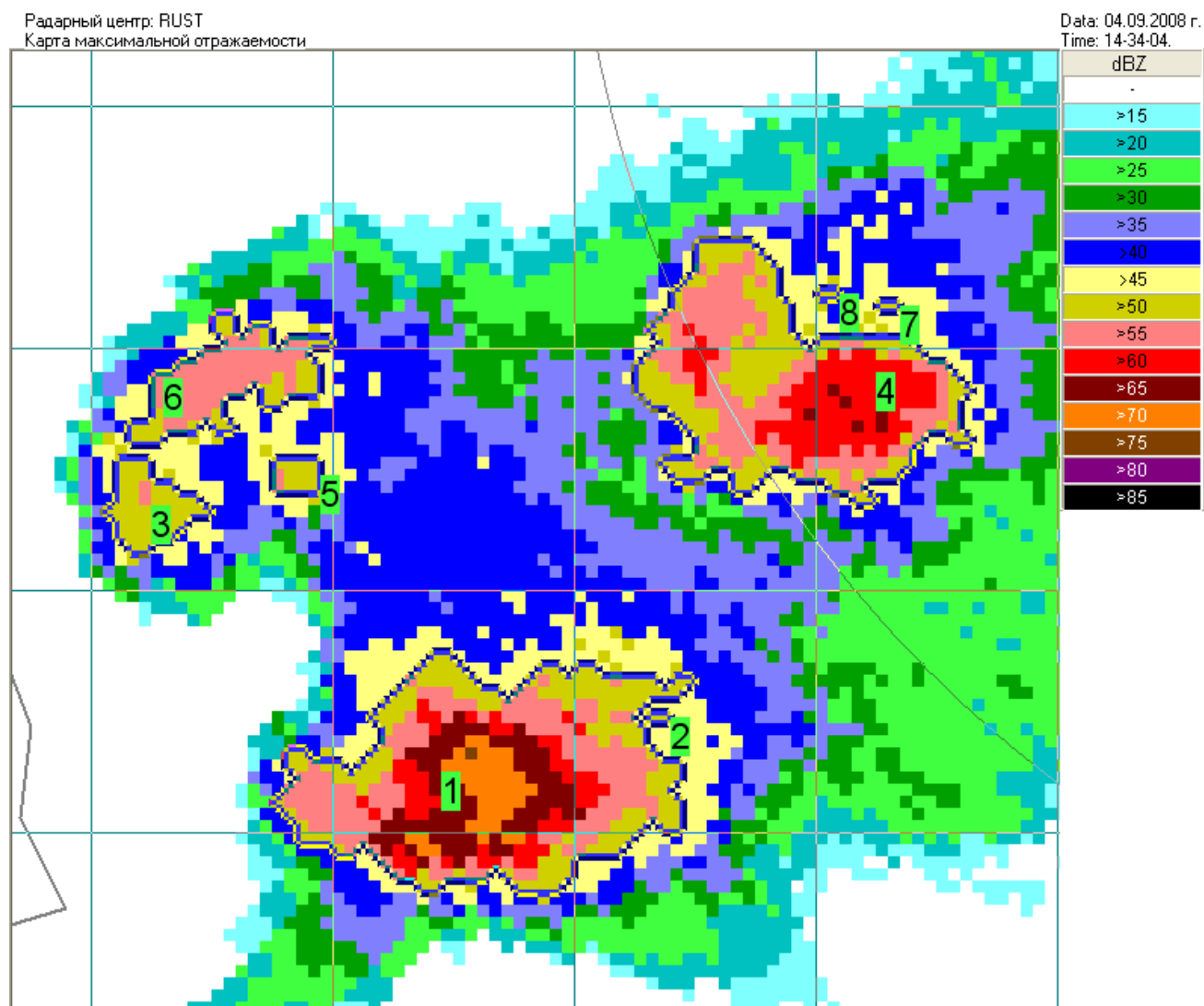


Рис. 2.7 - Пример карты выделения и нумерации конвективных ячеек

После выделения КЯ им присваиваются номера, начиная с № 1, обнуляющиеся каждые сутки в 0 часов. При обнаружении многоячейковой облачной системы в первом цикле радиолокационного обзора нумерация КЯ осуществляется с запада на восток и с юга на север (т.е. № 1 присваивается самой юго-западной КЯ, а последний номер присваивается КЯ, расположенной северо-восточнее всех). В следующих циклах обзора номера присваиваются в хронологическом порядке обнаружения КЯ (см. рис. 2.7). Номера присваиваются КЯ, площадь горизонтального сечения которых превышает пороговую (например, более 10 км<sup>2</sup>).

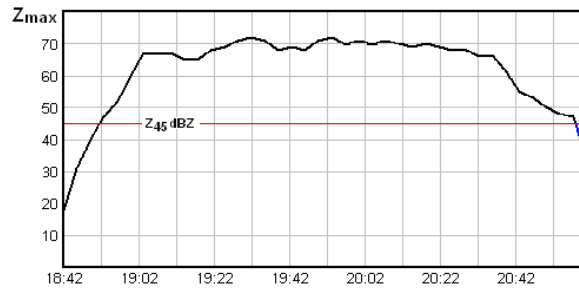
### **2.2.1 Автоматическое измерение параметров и построение графиков их эволюции во времени**

После решения задачи выделения КЯ решается задача автоматического измерения их параметров. В существующих автоматизированных радиолокационных системах [105,185] для измерения параметров ячейки нужно вручную локализовать КЯ (выделить ее в рамку), в пределах которой автоматически рассчитываются параметры КЯ путем обработки значений заданной радиолокационной величины во всех точках пространства от уровня стояния радиолокатора до высоты 20 км над уровнем моря.

Автоматическое выделение КЯ исключает необходимость ручной локализации КЯ и дает координаты проекции КЯ на горизонтальную плоскость, по которым сканируется требуемая область пространства и в соответствии с [4,109] измеряются около 100 одномерных, двумерных и трехмерных параметров КЯ, которые записываются в накапливаемую за весь период наблюдений таблицу параметров.

Построение графиков временного хода параметров КЯ осуществляется автоматически путем сохранения вместе с нумерацией КЯ координат центра масс, площади КЯ и таблицы параметров всех ячеек в радиусе обзора (200 км). При разделении КЯ на две, номер материнской КЯ сохраняется за той, к которой ближе центр масс, а второй КЯ присваивается следующий в хронологическом порядке номер. Параметры идентифицированных ячеек рассчитываются в каждом 3,5-минутном цикле обзора, вносятся в накапливаемую со временем наблюдений таблицу и наносятся на графики временного хода, позволяющие проследить эволюцию КЯ в течение всего времени их существования, включая стадии развития, квазистационарного состояния и диссипации (см. пример на рис. 3.6).

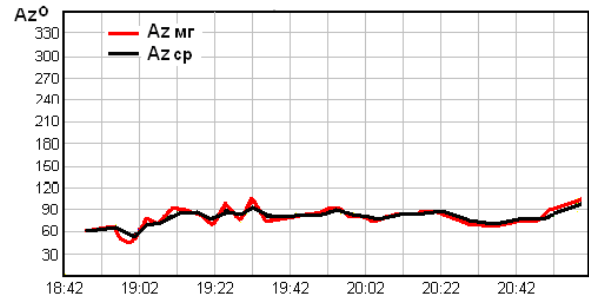
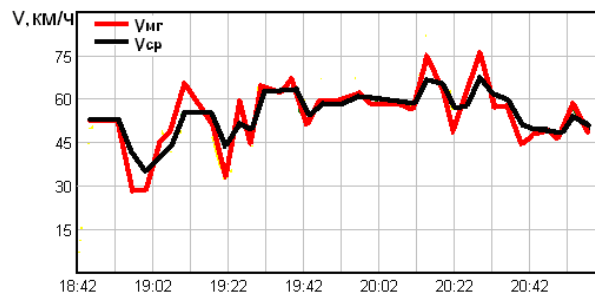
а) Временной ход радиолокационной отражаемости  $Z_{\max}$  в dBZ



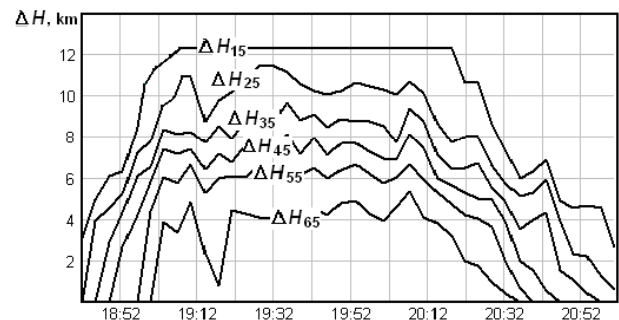
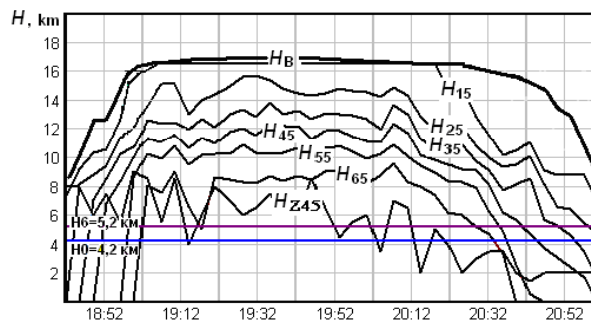
б) Временной ход площади  $S_{\text{радиоэха}}$ ,  $S_{\text{дождя}}$  и  $S_{\text{града}}$



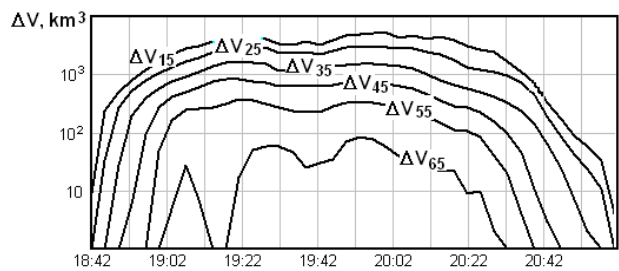
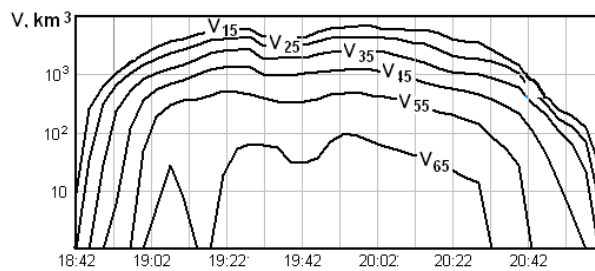
в) Временной ход скорости ( $V_{\text{мг}}$  и  $V_{\text{ср}}$  в м/с) и направления перемещения облака ( $Az_{\text{мг}}$  и  $Az_{\text{ср}}$  в градусах)



д) Временной ход высот изолиний  $Z = 15, 25, 35 \dots$  dBZ над уровнем моря ( $H$ ) и над уровнем изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $\Delta H$ ) в км



е) Временной ход объема всего облака ( $V$ ) и облачного слоя выше  $0^\circ\text{C}$  ( $\Delta V$ ) в  $\text{km}^3$ , ограниченных  $Z > 15, 25, 35 \dots$  dBZ



ж) Временной ход интегральной водности облака ( $M$ ) и облачного слоя выше изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $\Delta M$ ) в тоннах

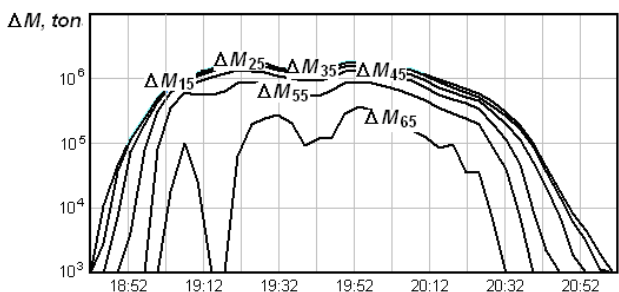
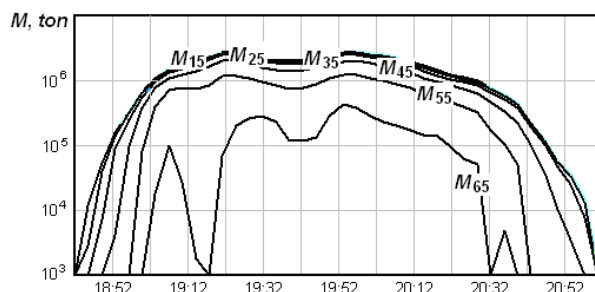


Рис. 3.6 Графики временного хода одномерных, двумерных и трехмерных параметров КЯ № 1 градового процесса, наблюдавшегося в Краснодарском и Ставропольском краях 30.08.2008 г.

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 поперечник 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. В случае же если произошло объединение конвективных ячеек в одну, то система распознает данную ячейку как вновь образованную, при этом оператор имеет возможность изменить номер новой ячейки, сохранив старую нумерацию.

### 2.2.2 Алгоритм расчета направления и скорости перемещения КЯ

Направление и скорость перемещения КЯ рассчитываются по перемещению центра масс, определяемого для каждой КЯ с учетом их полей отражаемости и координат по формулам:

$$x_{n,t} = \frac{\sum_{P_i \in C_n} (z_i \cdot x_i)}{\sum_{P_i \in C_n} x_i}; \quad y_{n,t} = \frac{\sum_{P_i \in C_n} (z_i \cdot y_i)}{\sum_{P_i \in C_n} y_i}, \quad (2.23)$$

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 вычисляются по формулам:

$$V_{n,t} = \frac{L_{n,t}}{\Delta t}, \quad (2.24)$$

$$A_{n,t} = \arctg \frac{y_{n,t} - y_{n,t-1}}{x_{n,t} - x_{n,t-1}}, \quad (2.25)$$

где  $V_{n,t}$  и  $A_{n,t}$  – скорость и направление перемещения центра масс КЯ, соответственно;  $\Delta t$  – 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:

$$L_{n,t} = \sqrt{(x_{n,t} - x_{n,t-1})^2 + (y_{n,t} - y_{n,t-1})^2}. \quad (2.26)$$

### **2.3 Метод, алгоритмы и программа идентификации навеса радиоэха градовых облаков**

Любая карта, применимая для наших исследований, представляет собой, отображение земной поверхности в радиусе 208 км от места расположения локатора с нанесенными на нее населенными пунктами, с указанием радиусов полета ракет из пунктов воздействия (красные окружности, рис.1), границ районов и т.д., на которую нанесены различные параметры, полученные в результате обработки объемного файла обзора, в частности, максимальная отражаемость [81].

Задача распознавания области засева по существу является задачей распознавания образов и анализа сцен [96]. Учитывая сложность этой задачи, идентификацию площадки засева в облачной системе предлагается осуществлять по следующему алгоритму [123]:

- считывание данных с МРЛ;
- получение 40 матриц  $800 \times 800$  значений, соответствующих горизонтальным сечениям с шагом 0,5 км;
- расчет матрицы  $800 \times 800$  значений, соответствующей высотам максимальной отражаемости в столбе;
- выделение в поле значений максимальной отражаемости радиоэха точек, ограничивающих замкнутые изолинии высот максимальной радиолокационной отражаемости;
- упорядочивание полученных точек, т.е. получение составных частей облаков;

- объединение составных частей в единые поля замкнутых изолиний  $H$ ;
- определения категории объекта воздействия;
- фильтрация конвективных ячеек, не подлежащих воздействию;
- выделение в КЯ областей со значениями высот максимальной отражаемости более 5 км при отражаемости менее 20 dBz.
- принятие их за навес радиоэха
- идентификация областей воздействия, их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке;

На рисунке 2.8 представлена карта максимальной отражаемости в системе с выделенными на ней красным цветом и пронумерованными областями зарождения града.

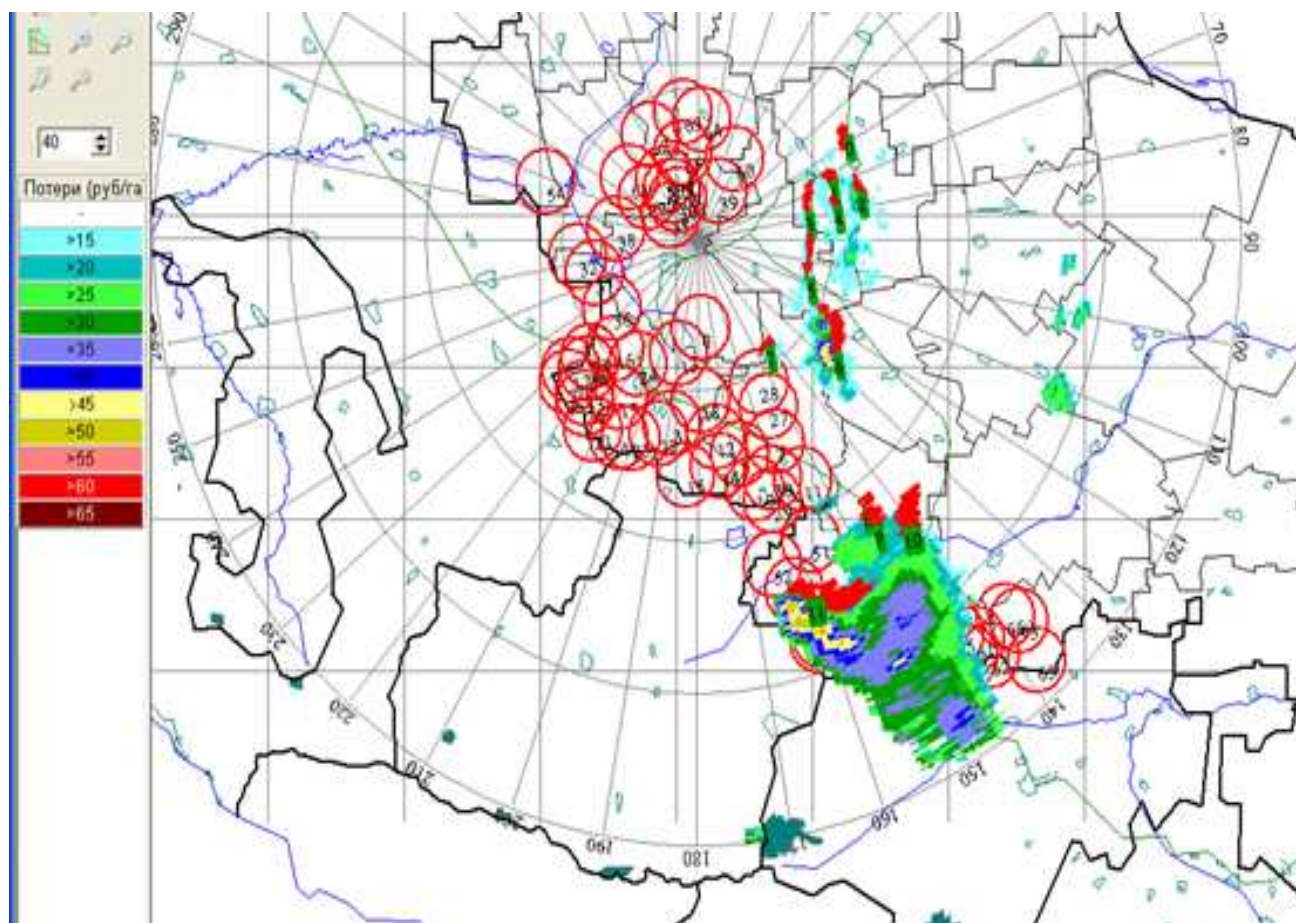


Рис.2.8 Карта максимальной отражаемости с выделенными красным цветом областями навесного радиоэха

Как показывает практика, по ходу перемещения градового облака на более низкой высоте, чем само градовое облако, сосредоточены так называемые фидерные облака, имеющие достаточно высокий водозапас, которые, подпадая в восходящие потоки движущегося градового облака, затягиваются в верхнюю его часть, где формируется град, и постоянно подпитывают его. Вследствие такой подпитки градовое облако начинает быстро расти в размерах [19].

Согласно концепции ускорения осадкообразования [7,19], являющейся физической основой современной российской технологии воздействия на градовые процессы, необходимо стимулирование более раннего и быстрого осадкообразования в областях будущего градообразования, чем при естественном ходе процесса. Сокращение времени формирования осадков нарушает баланс скоростей, необходимый для поддержания зародышей града в зоне роста. Зоной формирования условий для зарождения града является переохлажденная часть области нового роста, где происходит формирование условий для зарождения града (преимущественно конденсационный и зарождающийся коагуляционный рост облачных частиц). Она расположена в фидерных облаках несимметричных градовых ячеек и во вновь развивающихся конвективных ячейках одноячейковых процессов в интервале температур  $-5^{\circ}\text{C}$  –  $-20^{\circ}\text{C}$  и имеет отражаемость  $Z_{10} < 15$  dBZ. Однако мои исследования показывают, что в зоне формирования отражаемости достигают 20 dBZ [123].

Стадия формирования условий для зарождения града, на которые направлено воздействие с целью нарушения баланса скоростей, необходимых для поддержания зародышей града в зоне роста, является длительной стадией (20-30 мин) [7,19,123]. При этом скорость восходящего потока фидерных облаков зависит от скорости главного восходящего потока, так как является его составной частью. Логично было бы предположить, что максимальная отражаемость в столбе зоны формирования естественных зародышей будет стремиться к увеличению, по мере роста частиц. В результате, чем длиннее путь частицы до слияния с главной конвективной ячейкой, тем больше она

произвела столкновений. В нашем исследовании менялись пороговые значения высот и пороговые значения отражаемостей.

При значениях высот 5-6 км и отражаемости менее 20 dBz наблюдалось 87% совпадений с месторасположением навеса радиоэха, выделенных в ручном режиме. При этом в подавляющем большинстве случаев площадь, выделенная в автоматическом режиме, превышала площадь, выделенную в ручном режиме, не более чем на 30 процентов [123].

## **2.4 Метод, алгоритмы и программа автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному локатору**

С развитием техники и технологий потребность в качестве радиолокационной продукции возрастает с каждым годом. На сегодняшний день радиолокационная сеть России насчитывает более 150 метеолокаторов как ДМРЛ, так и МРЛ-5.

Для измерения радиолокационной отражаемости облаков и осадков необходимо знать постоянную радиолокационной станции  $C_{\lambda i}$  (метеорологический потенциал). Обычно для этого применяют метод стандартной радиолокационной мишени [48,69,89,316]. Также известен метод калибровки по солнцу [2].

В качестве стандартной мишени обычно используют полый алюминиевый шар радиусом  $r = 15,25$  см, имеющийся в комплекте ЗИП МРЛ-5. Может использоваться также матерчатый надувной шар радиусом не менее 15,25 см, обклеенный алюминиевой фольгой. Расчет константы МРЛ по данным измерений радиоэха стандартной мишени осуществляется по формуле ( $\text{см}^3$ ):

$$C_{\lambda i} = \frac{10^{0,1N} R^4 \tau \sigma^2}{3,54\sigma} \quad (4.1)$$

или

$$10 \lg C_{\lambda i} = N + 40 \lg R + 10 \lg \tau + 20 \lg \sigma - 10 \lg \sigma_s + 99,3, \quad (4.2)$$

где  $N$  - мощность радиоэха мишени, усредненная по множеству измерений, dB;

$R$  - наклонная дальность мишени, см;  $\tau$  - длительность импульса, мкс;

$\sigma = pr^2$  - поперечное сечение обратного рассеяния сферической мишени радиуса  $r$ , см<sup>2</sup>.

В случае калибровки по мишени, отпущенной в свободный полет, осуществляются непрерывные измерения  $R$  и  $N$  в режиме сопровождения мишени до исчезновения ее радиозха на уровне шумов. Строится кривая зависимости мощности радиозха  $N$  от расстояния  $R$ , которая уменьшается пропорционально  $R^4$ , и значение  $Cl$  рассчитывается по формуле:

$$10\lg Cl = N + 40\lg R - \text{const}, \text{ dB}, \quad (4.3)$$

где значение  $N$  может быть взято на расстоянии, например,  $R = 10^6$  см и  $\text{const} = 17,92$  (при  $r = 15,25$  см,  $q = 1,5^\circ$  и длительности импульса  $\tau = 2$  мкс).

Этот метод калибровки охватывает все параметры приемопередающего тракта и антенной системы МРЛ и является наиболее точным. Однако, несмотря на его преимущества, он не всегда применяется из-за проблем организации такой калибровки.

Предлагаемая методика и алгоритмы калибровки локаторов позволят по одному откалиброванному локатору провести автокалибровку всех остальных локаторов сети [126,127]. В конечном итоге это может позволить повысить эффективность противоградовой защиты, надежность штормового оповещения и метеобеспечения авиации, эффективность радиолокационных исследований облаков и т.д. [57,178,190,207,238]

Конвективная ячейка в облачной системе, выделяется как поле радиозха, ограниченное замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости ( $Z$ ,  $\text{dBZ}$ ) 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 калибровки по облакам и эталонному локатору является трудоемким многоэтапным процессом. Учитывая сложность этой задачи, решение этой задачи предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

- определение области, равноудаленной от двух локаторов - средней зоны (СЗ);
- выделение в поле радиозха облачности точек, ограничивающих замкнутые изолинии радиолокационной отражаемости  $Z$ ;
- упорядочивание полученных точек – получение составных частей КЯ;
- объединение составных частей КЯ в единые поля замкнутых изолиний  $Z$ ;
- выделение в поле радиозха вершин, ограниченных замкнутыми изолиниями  $Z$ ;
- идентификация КЯ и их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения;
- определение конвективных ячеек, центр которых входит в СЗ;
- измерение комплекса одно-, двух- и трехмерных параметров каждой КЯ;
- сравнение и корректировка поверяемого локатора с эталонным;
- расчет направления и скорости перемещения КЯ;
- оценка степени грозо- и градоопасности КЯ, распознавание категорий ОВ;
- документирование таблицы параметров КЯ и графиков их временного хода.

Решение поставленной задачи осуществляется путем обработки трехмерных полей радиолокационных сигналов, получаемых с помощью АМРК «АСУ-МРЛ», 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, радиальная дальность).

По подобным данным во всех существующих АМРК формируются различные карты (горизонтальных сечений на различных уровнях высот, верхней границы радиозха, максимальной отражаемости, интенсивности осадков, явлений погоды и т.д.), отображаемые на фоне карты местности.

Для реализации предлагаемой методики и алгоритмов идентификации КЯ осуществляется:

- преобразование полярных координат полученных сигналов в декартовые координаты;
- пересчет мощности радиоэха в отражаемость  $Z$  (по калибровочным данным);
- формирование матрицы данных об отражаемости  $Z$  во всех точках виртуального пространства  $X, Y, Z$  размером  $400 \times 400 \times 20$  км, содержащей псевдогоризонтальные сечения на 40 уровнях высот;
- построение карты максимальной отражаемости;
- последовательное сканирование точек виртуального пространства по  $X, Y$  и  $Z$  с шагом 0,5 км с целью выделения границ КЯ (западной, восточной, северной и южной), 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) полученные при переборе первые две точки, соответствующие южному краю первой подъячейки КЯ № 1, имеющие координаты  $X_{31}, Y_{31}, X_{B1}, Y_{B1}$ , где индексы «3» и «B» 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 КЯ № 1. Если  $X_{31} < X_{32} < X_{B1}$  и  $Y_{31} - 1 = Y_{32}$  или же  $X_{31} < X_{B2} < X_{B1}$  и  $Y_{31} - 1 = Y_{32}$ , то получаем следующие две точки первого контура КЯ. Если это условие не выполняется, то имеем дело либо с концом подъячейки, либо с новой подъячейкой. Таким образом, можно получить набор пар точек, составляющих подъячейку в последовательности с юга на север и с запада на восток.

На следующем этапе необходимо упорядочить точки, ограничивающие подъячейку, так как на первом этапе получена не последовательность точек, а набор пар точек. Зная количество пар точек, входящих в подъячейку, можно их

разделить на западные и восточные границы подъячеек и расставить по порядку. В результате этого выделяется контур подъячейки.

Для объединения подъячеек в единую ячейку необходимо сравнить северные и южные пары точек всех подъячеек со всеми параллельными точками текущей подъячейки на предмет принадлежности пар подъячеек одной КЯ и объединить каждый контур сплошными линиями, имеющими цвет, в соответствии с принятой палитрой цветов отображения полей отражаемости  $Z$ .

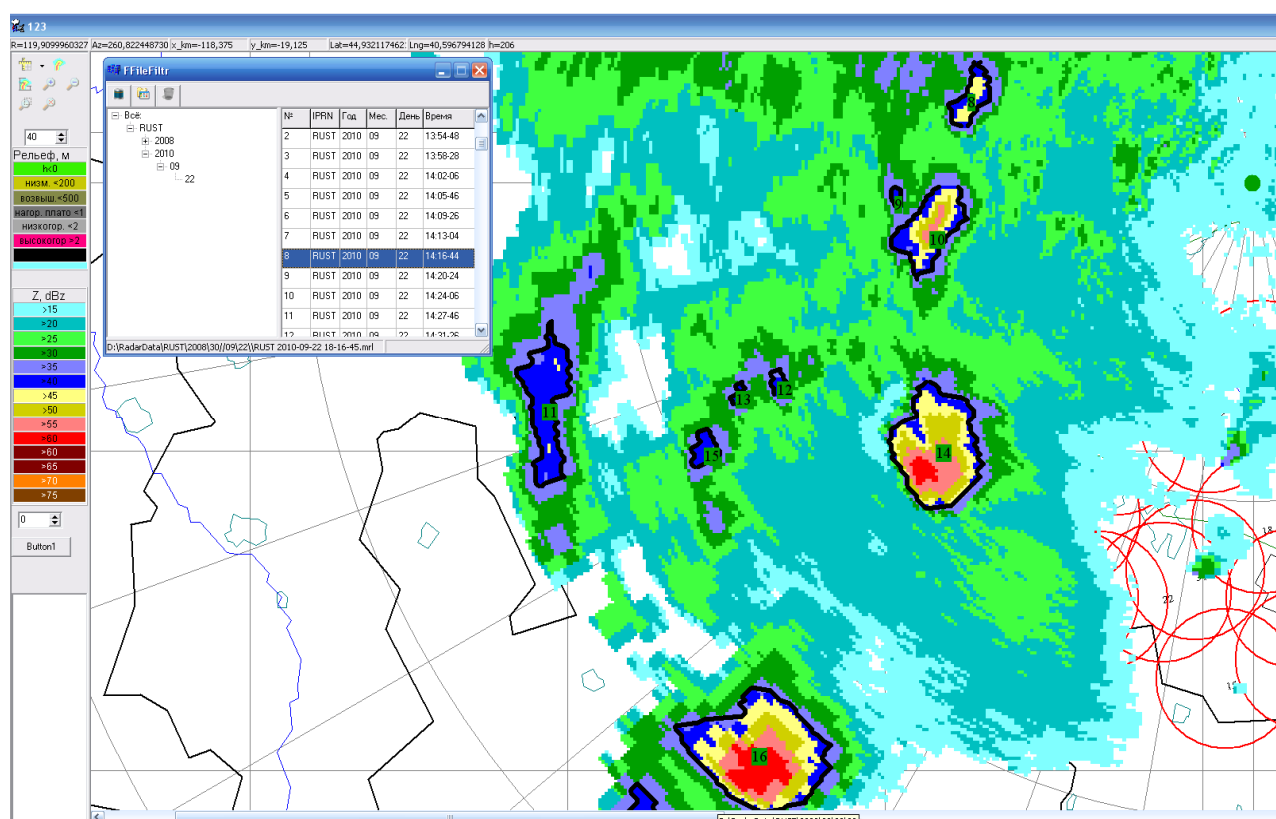


Рис. 2.9 Пример карты выделения и нумерации как мощных, так и маломощных конвективных ячеек

После выделения КЯ им присваиваются номера, начиная с № 1 в каждые сутки. 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 следующих

циклах обзора номера присваиваются в хронологическом порядке обнаружения КЯ (см. рис. 2.9). Номера присваиваются КЯ, площадь горизонтального сечения которых превышает пороговую (например, более 10 км<sup>2</sup>).

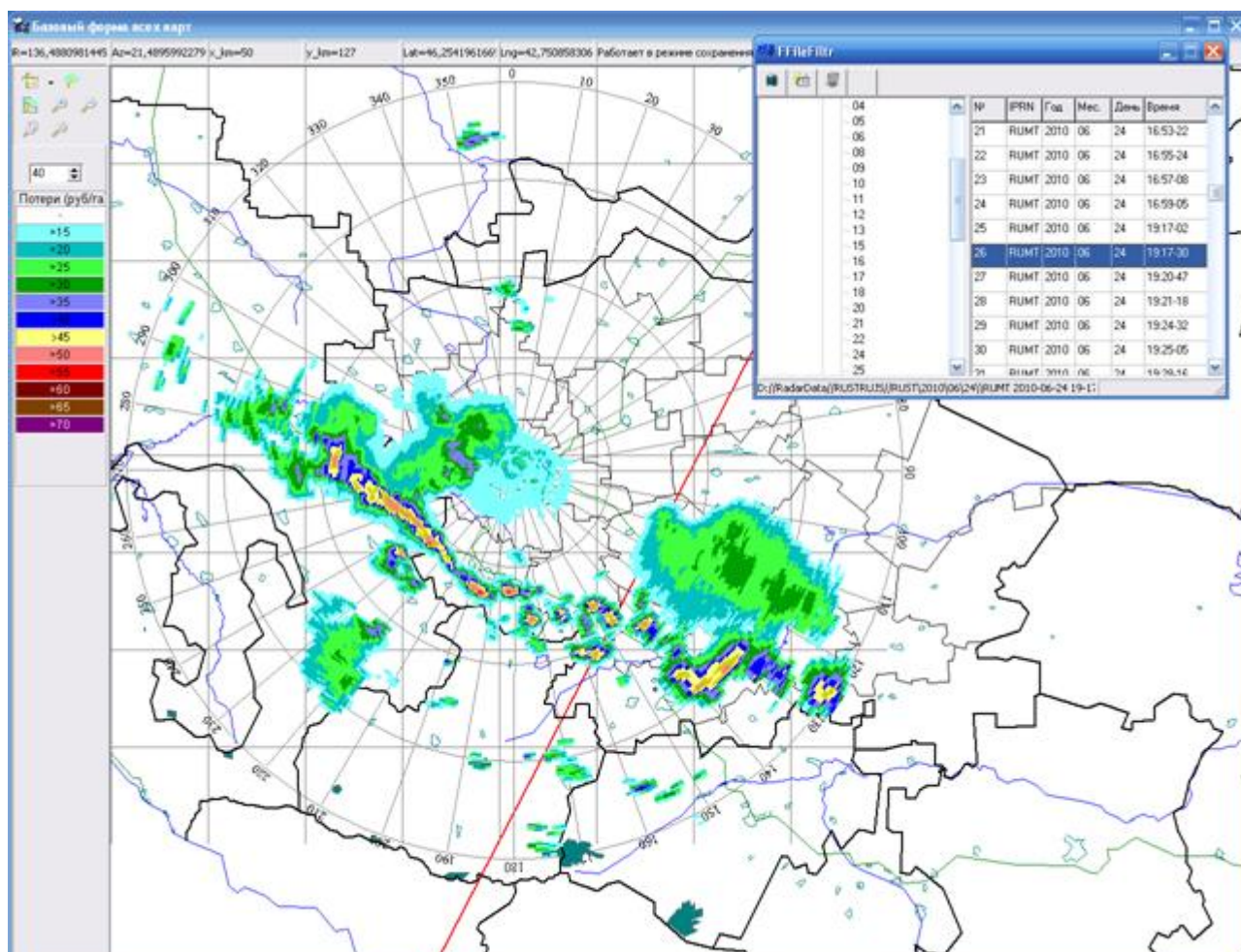


Рис 2.10 Карта с отображением линии, равноудаленной от двух локаторов, для маломощных конвективных ячеек

После выделения и нумерации КЯ ищем КЯ, равноудаленные от двух локаторов эталонного и поверяемого (см. рис. 2.10, 2.11). Для этого, используя формулу расстояния между двумя точками (2.26), выражаем условие равноудаленности прямой от локаторов (2.27). Далее, выразив  $x_0$  (2.28), находим искомое уравнение прямой, равноудаленной от двух локаторов

$$AB = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (2.26)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = (y_0 - y_2)^2 - (y_0 - y_1)^2 \quad (2.27)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = x_0^2 - 2x_0x_1 + x_1^2 - x_0^2 + 2x_0x_2 - x_2^2 = x_1^2 - x_2^2 + 2x_0(x_2 - x_1) \quad (2.28)$$

$$(y_0 - y_1)^2 - (y_0 - y_2)^2 = y_0^2 - 2y_0y_1 + y_1^2 - y_0^2 + 2y_0y_2 - y_2^2 = y_1^2 - y_2^2 + 2y_0(y_2 - y_1) \quad (2.29)$$

$$x_1^2 - x_2^2 + 2x_0(x_2 - x_1) = y_1^2 - y_2^2 + 2y_0(y_2 - y_1) \quad (2.30)$$

$$x_0 = \frac{2y_0(y_2 - y_1) + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 + x_2^2}{2(x_2 - x_1)} \quad (2.31),$$

где  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  – координаты эталонного и калибруемого локаторов соответственно.

Далее проверяют попадание максимального значения отражаемости конвективной ячейки в область, равноудаленную от двух локаторов (плюс-минус 5 километров), т.е. среднюю зону.

В основе данного метода лежит идея подсчёта количества пересечений горизонтального луча, исходящего из точки максимального радиоэха конвективной ячейки со сторонами многоугольника. Точка не принадлежит многоугольнику, если количество пересечений четное.

1. Для этого перебирают все соседние пары вершин  $A[n]$  и  $A[n+1]$  многоугольника. Если максимальное значение отражаемости рассматриваемой КЯ по  $y$  координате лежит между текущими вершинами, то мы можем пустить параллельный оси  $X$  луч в одну из сторон.

2. Далее проверяем пересечение луча с отрезком.

Для этого:

- составим уравнение прямой, проходящей через 2 точки  $A[n]$  и  $A[n+1]$

$$\frac{X - A[n].X}{A[n+1].X - A[n].X} = \frac{Y - A[n].Y}{A[n+1].Y - A[n].Y} \quad (2.32)$$

- выразим  $X$  из уравнения

$$X = \frac{(Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X)}{A[n+1].Y - A[n].Y} + A[n].X \quad (2.33)$$

- подставим вместо  $X$ ,  $Y$  координаты нашей точки.

$$3. \text{ Если } X > \frac{Y - A[n].Y}{(A[n+1].Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X) + A[n].X}, \quad (2.34)$$

то точка находится правее (левее, если обход многоугольника против часовой стрелки) по  $X$  от отрезка  $A[n] A[n+1]$  и у нас есть пересечение.

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

На рисунках 2.10, 2.11 приведены примеры карт с попаданием как маломощных, так и мощных конвективных ячеек в среднюю зону.

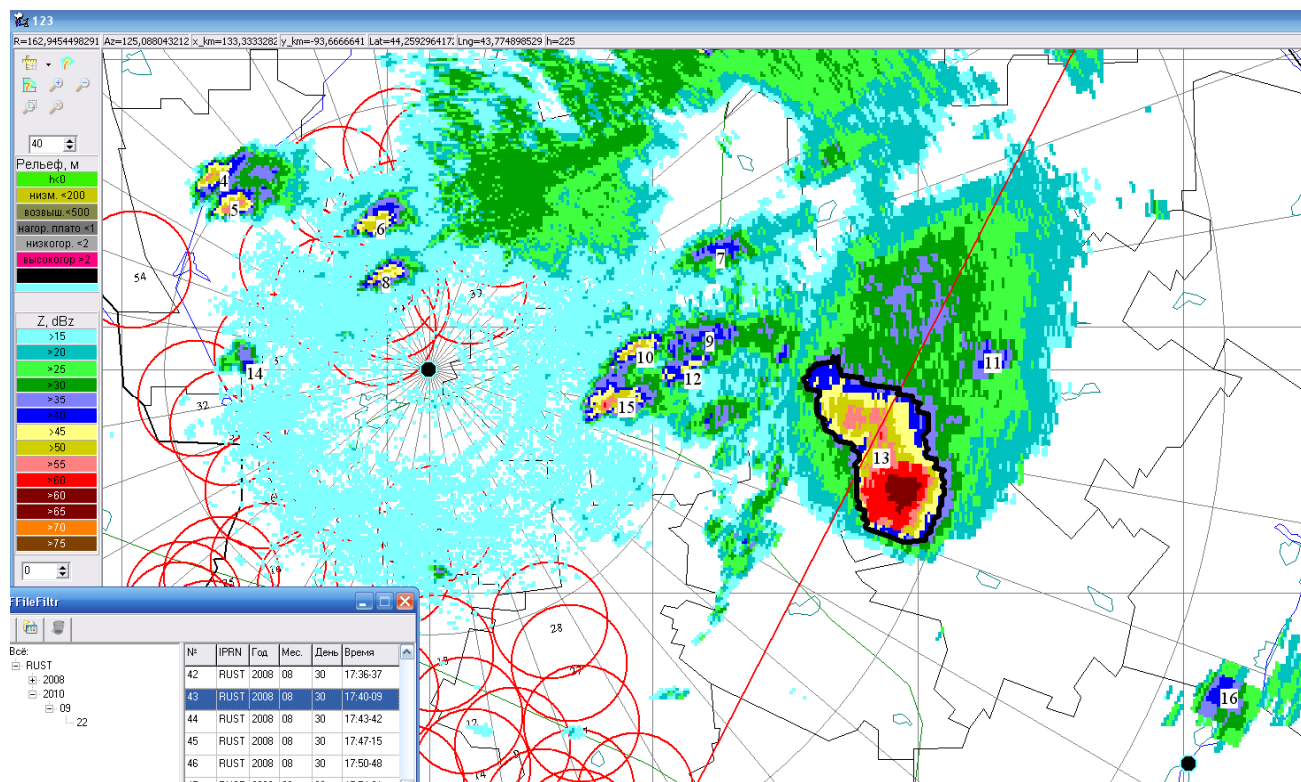


Рис. 2.11 Карта с отображением линии, равноудаленной от двух лоцаторов с попаданием в СЗ мощной КЯ

## 2.5 Методы и алгоритм фильтрации аномальной рефракции

### 2.5.1 Фильтрация аномальной рефракции с помощью двух лоцаторов.

Одной из серьезных проблем радиолокации является проблема распознавания сигналов от местных предметов при аномальной рефракции. Эта проблема в удовлетворительной степени решается в доплеровских радиолокаторах за счет отсекаания отражений с нулевыми или малыми радиальными скоростями, так как облачные гидрометеоры, в отличие от помех, связанных с рельефом, обычно имеют определенную скорость. Однако данная

проблема практически не решена или частично решена в некогерентных локах типа МРЛ-5 [122,194,198-201]. В зависимости от потока солнечной радиации и характера подстилающей поверхности слои атмосферы после ночного выхолаживания прогреваются по-разному. Если нижние слои воздуха прогреваются больше, чем верхние, они становятся оптически более разреженными и менее преломляющими, вследствие чего лучи света изгибаются в направлении от Земли [205]. Отдельные объекты, обычно невидимые, становятся видимыми, возникают артефакты на картах отражаемости. В тех случаях, когда искривление лучей бывает чрезвычайно сильным, наблюдается рефракция и сверхрефракция. Изображение может располагаться над предметом (верхняя рефракция) и под предметом (нижняя рефракция). В горах возможно возникновение и бокового миража.

Явления верхней рефракции обязаны своим происхождением резкому падению плотности воздуха в вертикальном положении. Это может наблюдаться зимой в холодных странах, когда вблизи земной поверхности образуется холодный слой воздуха, в котором показатель преломления быстро убывает с высотой. При верхней рефракции, помимо самих предметов, видны и их изображения, расположенные сверху. Явление нижней рефракции, как обратные явления верхней, должны быть обусловлены ростом плотности воздуха вверх. Нижняя рефракция наблюдается в пустынях и в степях в теплое время года, когда прилегающий к земной поверхности слой воздуха сильно нагрет, а его плотность и показатель преломления быстро возрастают с высотой. В горах, хотя и редко, наблюдается боковая рефракция, связанная с изменением показателя преломления воздуха в боковом направлении. Рефракция изучена недостаточно. Все зависит от коэффициента преломления воздуха, который зависит от плотности воздуха, который, в свою очередь, зависит от температуры и от температуры потоков воздуха, дующих над землей. При этом будут возникать границы разделов между холодным и теплым, что будет приводить к отклонению лучей света. (Образованию дополнительной воздушной линзы). Если даже нет потоков воздуха (ветра), а

стоит полный штиль, изменение коэффициента преломления приводит также к изменению хода световых волн. Коэффициент преломления воздуха равен  $n = 1.000292$  при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ . Этот показатель напрямую зависит от температуры и давления.

Известно, что основные проблемы при радиолокационных наблюдениях возникают в случаях повышенной, критической суперрефракции, в которых при малых углах возвышения антенны обнаруживаются местные предметы (местники), расположенные ниже радиогоризонта [19]. Для борьбы с аномальной рефракцией в автоматическом режиме прежде всего необходимо распознать появление аномально-рефракционной картины на карте радиолокационного обзора [13,122]. Для этого была разработана методика автоматического определения появления местников, заключающаяся в следующем:

- 1) Перевод географических координат локаторов в декартовы.
- 2) Перевод декартовой системы одного локатора в декартовую систему другого локатора.
- 3) Перевод из декартовой системы в сферическую систему двух и более локаторов относительно эталонного МРЛ.
- 4) Определение точек, общих для двух или нескольких локаторов.
- 5) Определение момента появления аномальной рефракции по разности отражаемостей с двух и более локаторов.
- 6) Определение по разности отражаемостей с разных локаторов в одном и том же облаке область с аномальным радиоэхо.

Для решения поставленной задачи необходимо перевести географические координаты в декартовы, а затем провести следующие преобразования:

$$l = L_2 - L_1 \quad (2.35)$$

$$p = \sin l * \cos B_2 \quad (2.36)$$

$$q = \cos B_1 * \sin B_2 - \sin B_1 \cos B_2 * \cos l \quad (2.37)$$

$$Az = a \tan\left(\frac{p}{q}\right) \quad (2.38)$$

$$R = a \tan\left(\frac{p * \sin Az + q * \cos Az}{\sqrt{1 - (p * \sin Az + q * \cos Az)^2}}\right) * 6371.117 \quad (2.39)$$

$$X = R * \sin Az \quad (2.40)$$

$$Y = R * \cos Az \quad (2.41)$$

Здесь  $B_2 L_2$  и  $B_1 L_1$  широта и долгота точки стояния локатора и точки, принятой за центр карты, соответственно;  $X, Y$  – координаты точки  $B_2 L_2$ , переведенные в декартову систему относительно точки  $B_1 L_1$ . Центр одного из локаторов принимают за центральную точку карты. Координаты другого локатора переводят в декартову систему координат относительно первого локатора. Далее сферические координаты локатора переводят в декартовы

$$dx = \rho \cos \theta * \cos(90 - \varphi) \quad (2.42)$$

$$dy = \rho \cos \theta * \sin(90 - \varphi) \quad (2.43)$$

$$dz = \rho \sin(\theta) \quad (2.44)$$

$$X = x + dx \quad (2.45)$$

$$Y = y + dy \quad (2.46)$$

Полученные значения координат  $X, Y$  переводят в сферические относительно первого локатора по следующим формулам:

$$\rho' = \sqrt{X^2 + Y^2 + dz^2} \quad (2.47)$$

$$\varphi' = 90 - a \tan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2.48)$$

$$\theta' = a \sin\left(\frac{\rho}{\rho'}\right) * \sin \theta \quad (2.49)$$

Переводим точки обоих локаторов в декартову систему координат по формулам (2.42-2.46) и получаем близлежащие точки с координатами  $(X_1 Y_1 Z_1)$  и  $(X_2 Y_2 Z_2)$ , по формуле (2.50) находим расстояние между этими точками.

$$dL = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (2.50)$$

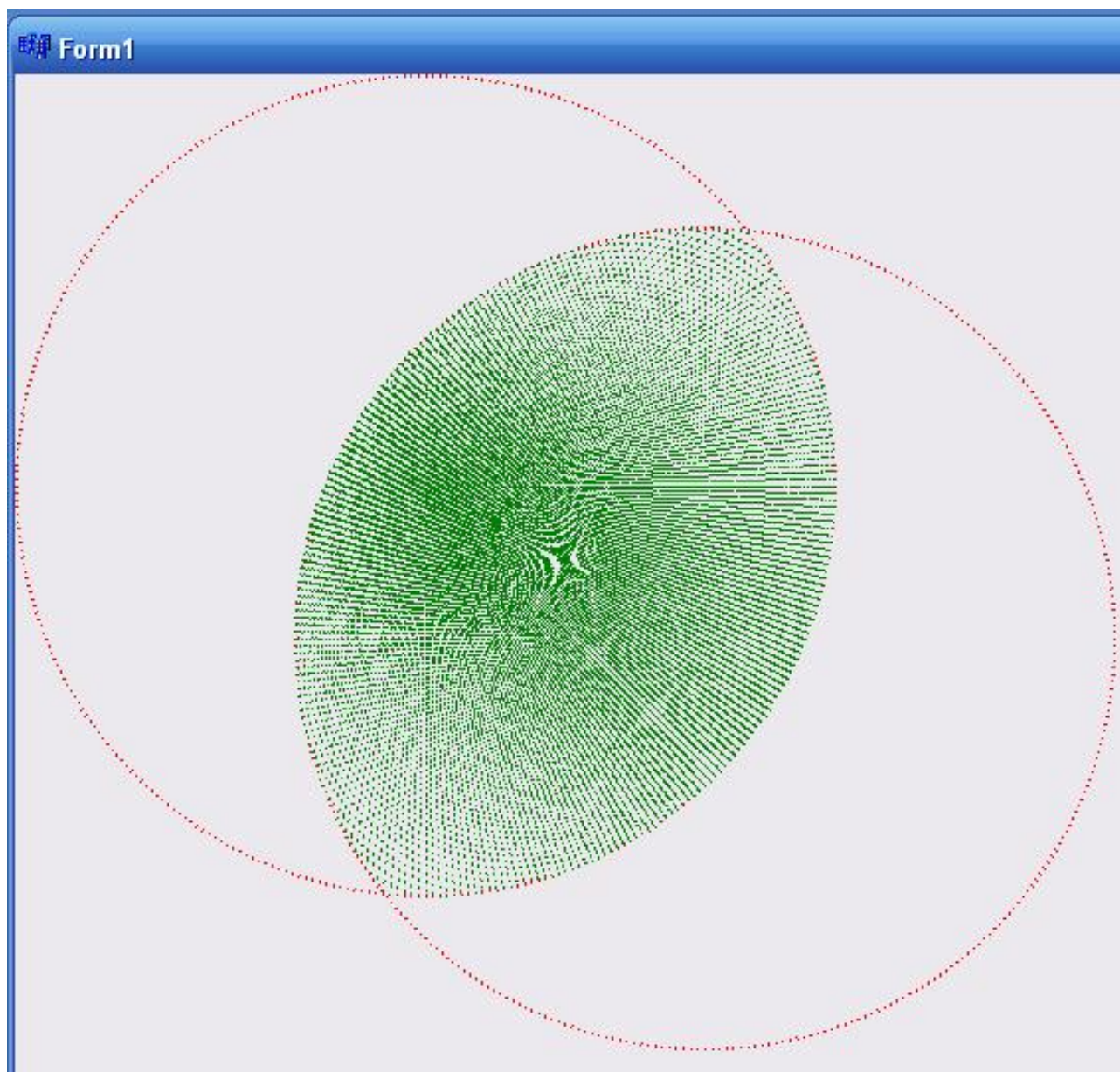


Рис.2.12 Парные точки с расстоянием, не отличающимся более чем на 0.5 км для Ставропольского и Зеленокумского локаторов

Используя данную методику, были вычислены парные точки с расстоянием, не отличающимся более чем на 0.5 км для Ставропольского и Зеленокумского локаторов (см. рис. 2.12).

Для анализа радиолокационной информации с двух локаторов в случае отображении сигналов от местников при аномальной рефракции, подбираются обзоры, время получения которых отличалось бы не более, чем на 5 минут. И если в близлежащих точках есть разница в отражаемости более 40 dBz в утренние и ночные часы, когда часто наблюдаются случаи с аномальной рефракцией, за реальное принимается наименьшее из двух значений. При этом в случае нахождения более 50 – 60 точек (порог можно менять, анализируя архивные данные слоя конкретного региона) с разностью в отражаемости более 30 dBz, можно утверждать, что имеет место явление аномальной рефракции (см. рис.2.13).

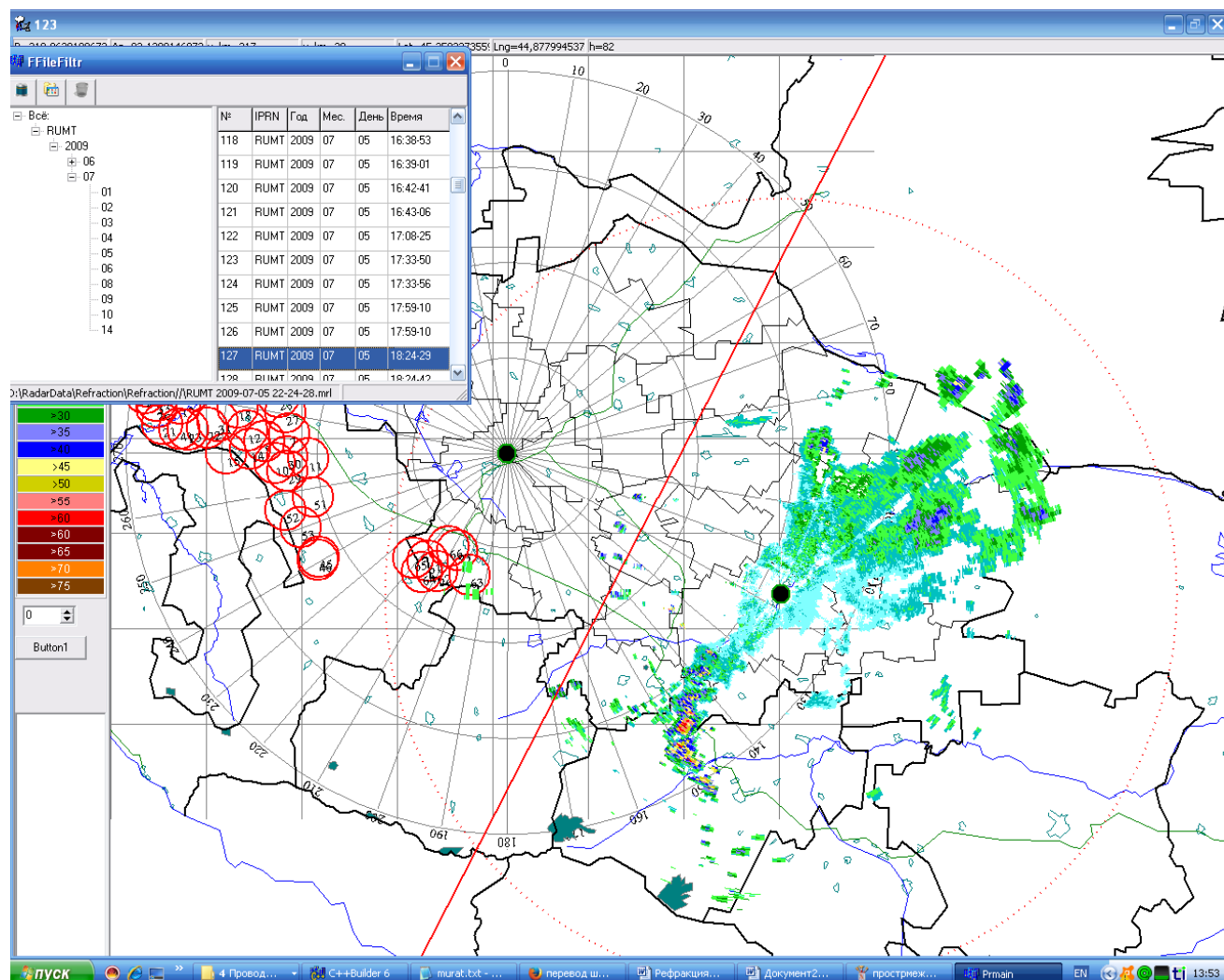


Рис. 2.13 Пример автоматического обнаружения файла с аномальной рефракцией, возникшей между Ставропольским и Зеленокумским локами

### 2.5.2 Метод фильтрации по месту появления

В автоматизированных системах МЕРКОМ и АКСОПРИ с рефракцией борются обнулением сигналов от местников при нормальной и аномальной рефракциях [203]. Этот метод опасен тем, что при аномальной рефракции будут вырезаны области, где на самом деле нет местников, что, в свою очередь, приведет к необнаружению опасных явлений погоды на вырезанном участке. При этом, если радиолокатор установлен в гористой местности, а нами неоднократно наблюдалось блуждание сигналов, отраженных от местных предметов в зависимости от времени года, то использование данного метода чревато потерей информации на обширной территории в приземном слое.

Более действенным и эффективным является другой полуавтоматический метод борьбы с аномальной рефракцией. После того как было определено, что обзор был сделан в условиях аномальной рефракции, необходимо определить область и место появления псевдосигнала в условиях аномальной рефракции. Для этого необходимо:

- в ручном режиме разово локализовать область появления аномально рефракционной картины;
- занести координаты локализованной области в базу данных;
- если данная зона расположена в области перекрытия двух и более МРЛ, вести автоматический сравнительный анализ ложных ячеек по данным двух и более радаров. В случае разницы в отражаемости более 40 dBz обнулять область псевдоконвективной ячейки.
- Если место отображения сигнала об аномальном радиозехе находится в зоне видимости только одного метеолокатора, то необходимо в области, локализованной в ручном режиме и занесенной в базу данных, обнулять отражаемость в заданных нижних углах радиолокационного зондирования.

Для реализации данного метода необходимо в момент появления аномальной рефракции в ручном режиме выделить область появления аномальной рефракции (см. рис.2.14).

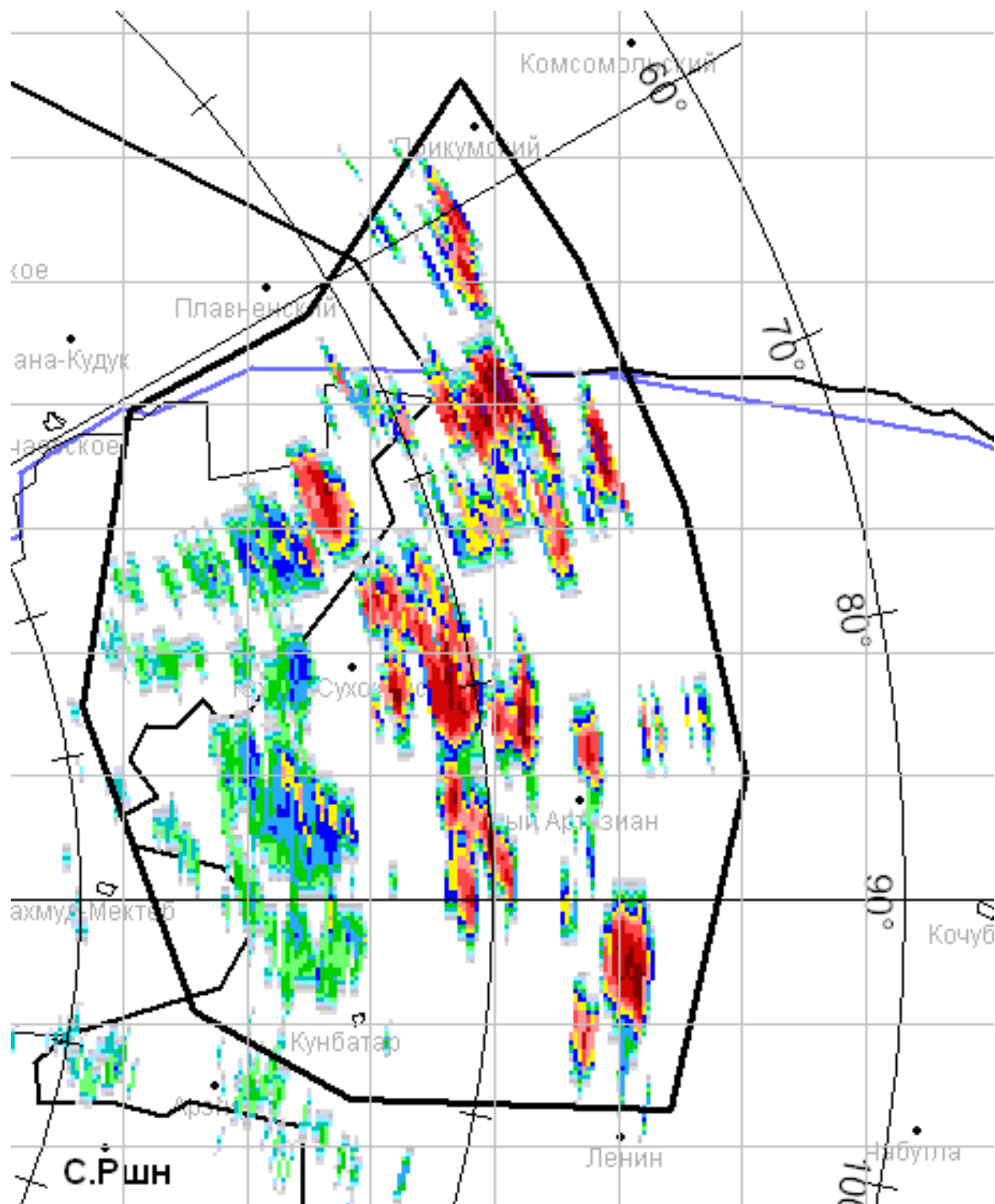


Рис. 2.14 Выделение области аномальной рефракции

Далее задается угол возвышения антенны радиолокатора, до которого будут вырезаться данные (см. рис.2.1). При этом изменение угла возвышения должно быть плавным, чтобы уменьшить возможную потерю полезных данных.

Эти данные для каждой группы местников должны храниться в отдельном файле.

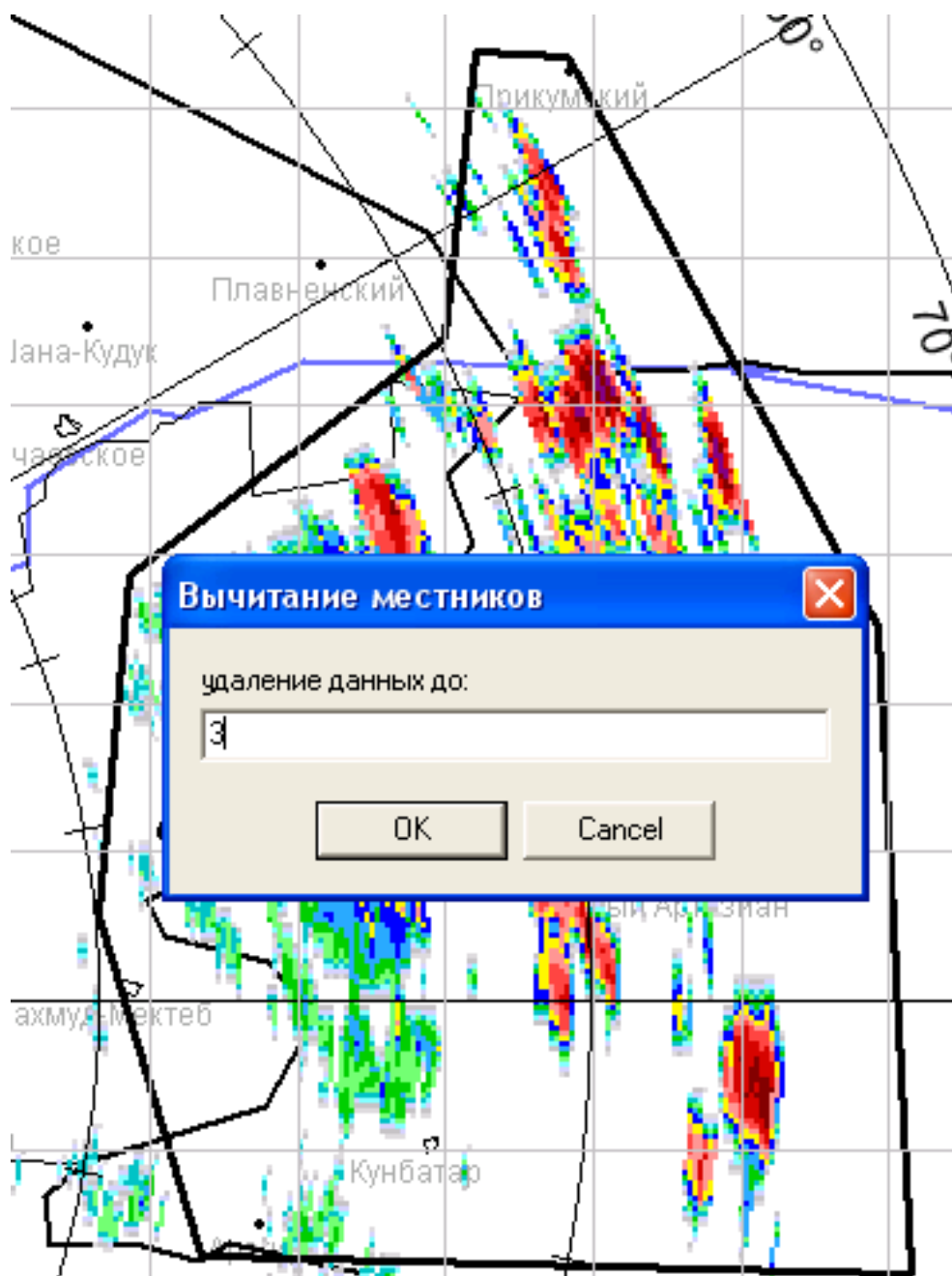


Рис.2.15 Задание угла возвышения, до которого вырезаются данные в файле обзора

Выделенные местники при появлении на карте АСУ срезаются до заданного угла места на заданном участке. Периодически отключается фильтрация местников для просмотра картины, и, если местники не появляются

без фильтрации рефракции, то файлы с рефракционными данными удаляются (см. рис. 2.16).

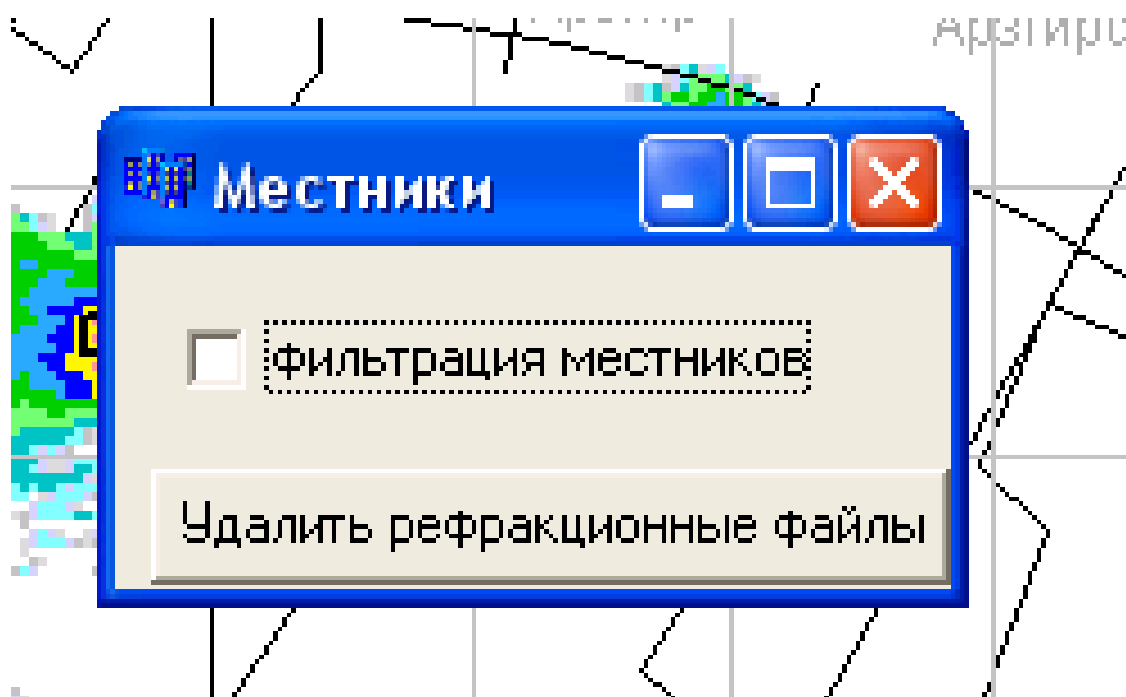


Рис. 2.16 Пример отключения и включения механизма полуавтоматической фильтрации местников

Метод автоматической идентификации конвективных ячеек позволяет автоматически распознавать область радиоэха в любой области пространства радиолокационного обзора [9]. Этот метод может вести мониторинг параметров поля радиоэха. Система в состоянии распознать местники на первых этапах появления аномальной рефракции как конвективные ячейки, при этом вести временной ход параметров этих «ячеек». Каждой псевдоячейке будет присвоен номер с последующим определением скорости и направления движения, в результате чего система будет в течении нескольких циклов обзора выдавать близкие к нулевым значения коэффициентов скорости и перемещения ячейки. Именно по этому критерию сигналы от местных предметов (в области обзора двух и более радаров) могут фильтроваться при аномальной рефракции.

Если же область, в которой появились высокие значения отражаемости, ранее была занесена в базу данных как место появления аномально рефракционной картины, и высокие отражаемости появились в утренние или

ночные часы, то можно в автоматическом режиме обнулять радиолокационную информацию в заданных углах файла обзора.

Недостатком приведенного метода является следующее – в случае люфта в антенной колонке, нужно вводить поправку на возможные незначительные колебания конвективных ячеек при идентификации их как местников. А это, в свою очередь, может при несколько завышенном коэффициенте скорости и направления перемещения конвективной ячейки привести к неправильному распознаванию реальных малоподвижных облачных масс, т.е. малоподвижная облачная масса может идентифицироваться как сигнал от местников при аномальной рефракции.

Фильтрация местников в полуавтоматическом режиме является наиболее оптимальным режимом фильтрации, но она нуждается в участии персонала. Фильтрация же в автоматическом режиме требует набора большого экспериментального материала и подбора оптимальных вариантов определения коэффициентов движения облачных масс.

## **2.6 Метод определения грозо- и градоопасности территории в зависимости от рельефа местности**

Определение грозо- и градоопасности территорий является актуальной задачей при выборе защищаемых территорий, при работах по предотвращению града, при выборе мест прокладки электропроводов и других видах работ зависящих от грозовой активности [39,179]. Рельеф местности оказывает существенное влияние на грозоградовую активность исследуемой территории [249,251].

Метод определения грозоградовой активности включает в себя [106]:

- создание трех матриц 832 на 832 значения, соответствующих проекции области сканирования локатора равной  $416 \text{ км}^2$  на площадки  $0,25 \text{ км}^2$ ;
- преобразование данных о высотах над уровнем моря на территории сканирования МРЛ из географических координат в декартовы;
- занесение данных в первую матрицу;

- построение карты рельефа местности (см. рис.2.17);

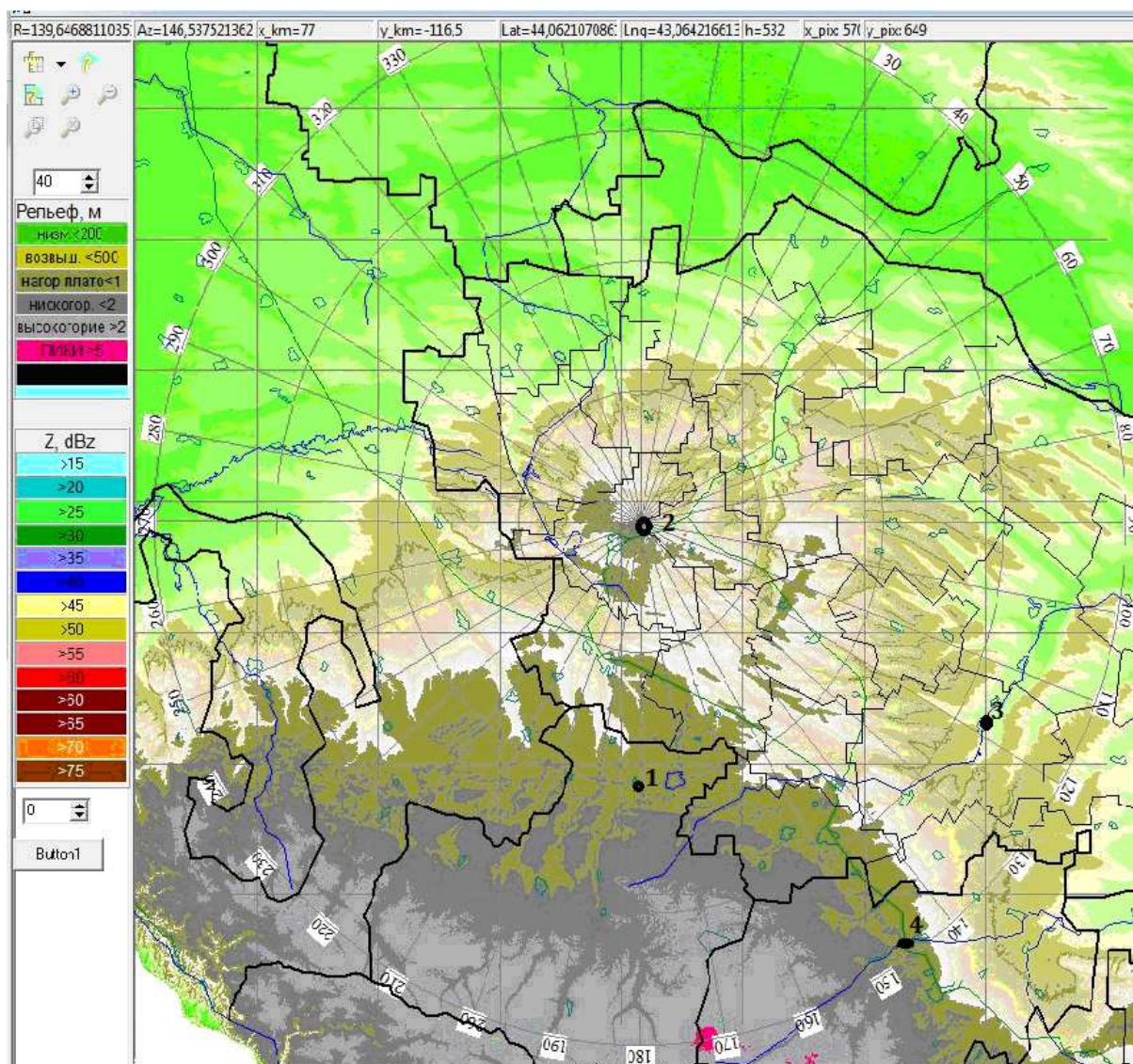


Рис. 2.17 Орография местности на которой проводились исследования грозовой активности, где 1-4 грозорегистраторы

- подключение архива грозопеленгационных данных;
- обнуление всех данных второй матрицы;
- последовательный перебор информации о молниях типа «облако-облако»;
- перевод географических координат разрядов в декартовы;
- если разряд был зафиксирован в радиусе 208 км от радара, нахождение элемента матрицы соответствующего координатам зафиксированного разряда;

– создание и обнуление переменных, предназначенных для подсчета разрядов, образующихся на высотах, разделенных по группам:

1. Низкогорье от 0 до 200 метров;
2. Возвышенности от 200 до 500 метров;
3. Нагорные плато от 500 м до 1 км ;
4. Низкогорье от 1 км до 2 км ;
5. Высокогорье более 2 км.

– определение процентного соотношения высот над уровнем моря на исследуемой территории (рис.2.18).

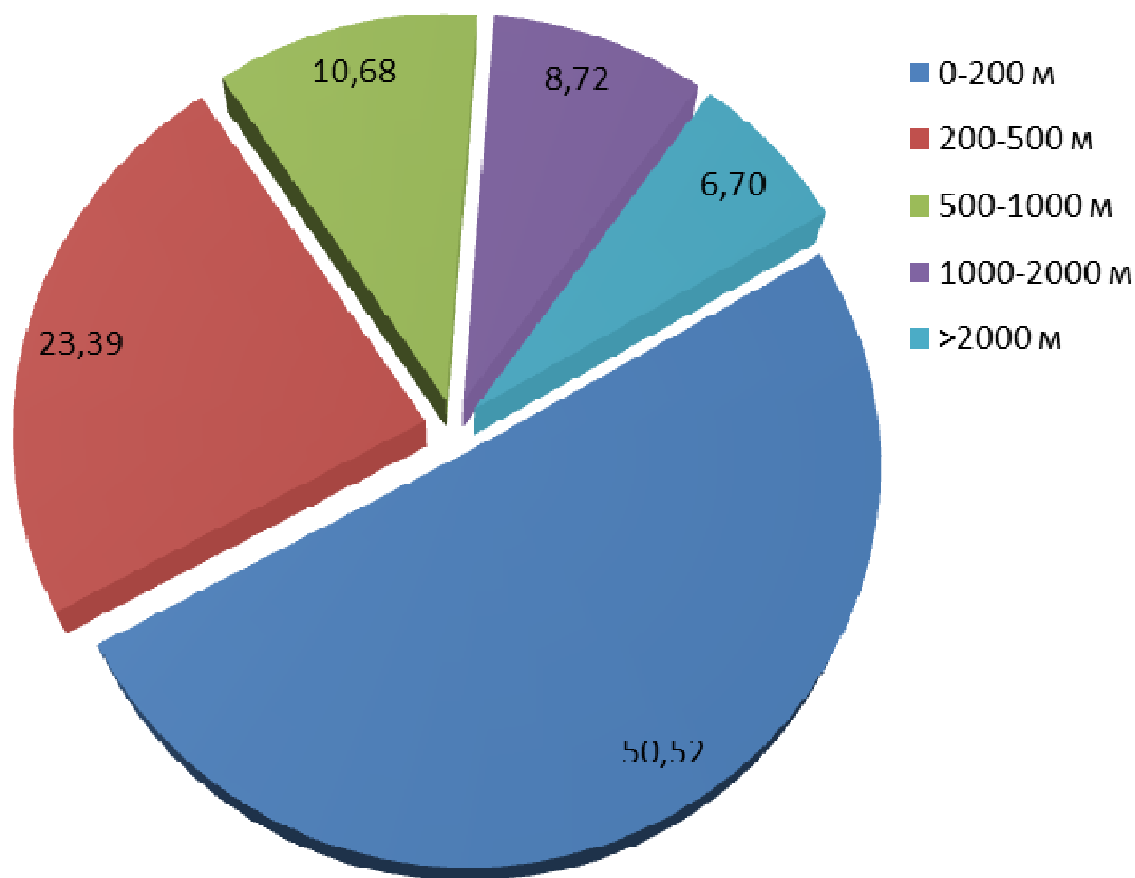


Рис.2.18 Процентное распределение исследуемой области по высотам рельефа

– прибавление значению матрицы, соответствующей по координатам месту фиксации молнии, единицы;

– в зависимости от высоты рельефа прибавление к значению переменной единицы;

– подбор данных из базы радиолокационных обзоров по координате и

времени фиксации разряда;

- подбор максимального значения отражаемостей в радиусе 3 км от разряда в заданном интервале времени;

- по окончании года вывод матрицы в текстовый файл с построением графической карты количества молний типа «облако-облако» (см. рис. 2.19);

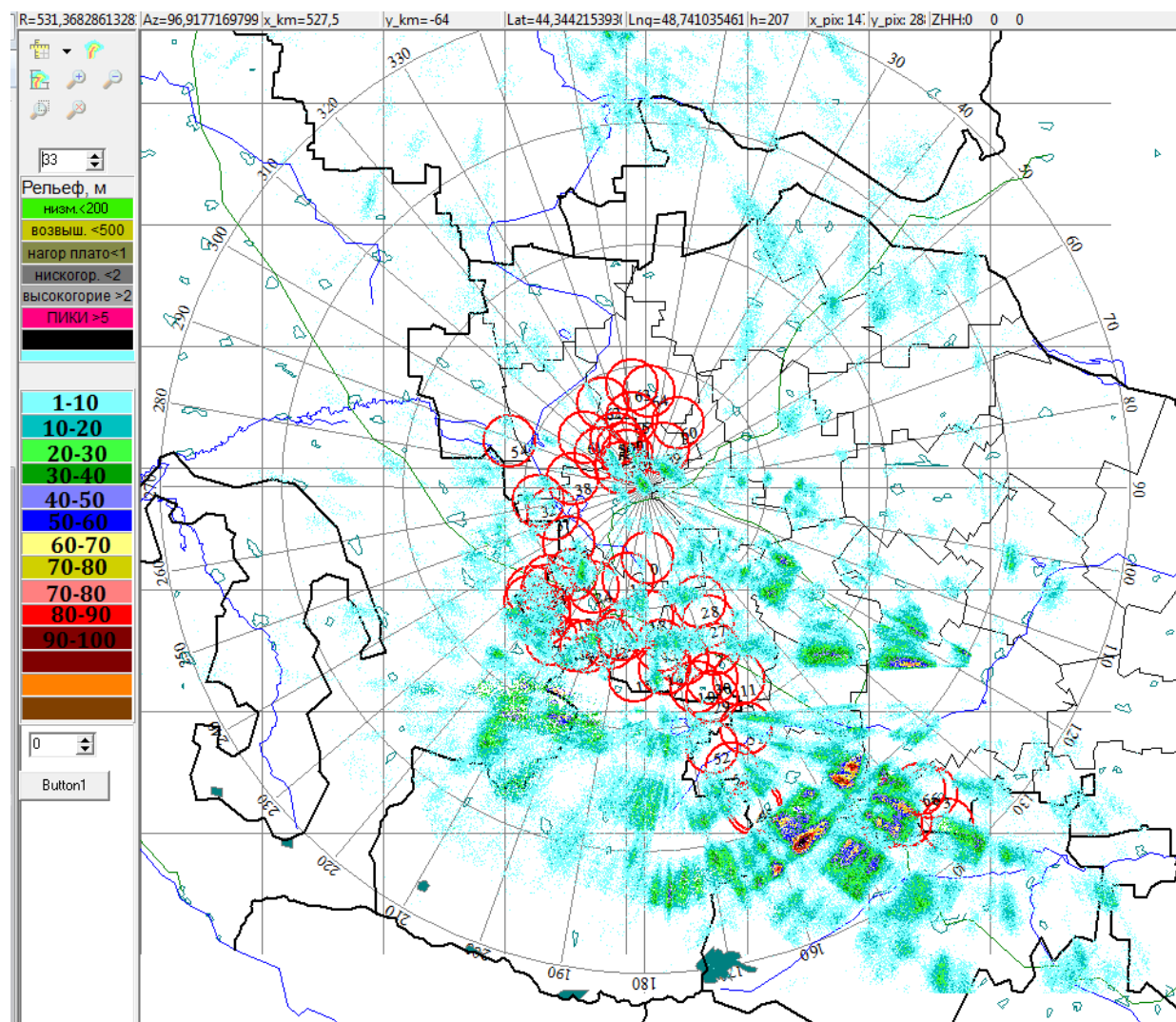


Рис. 2.19 Пример карты количественного годового распределения гроз типа «облако-облако» на карте в радиусе обзора МРЛ

- обнуление всех данных третьей матрицы.
- последовательный перебор информации о разрядах типа «облако-земля»;
- перевод географических координат в декартовы;
- если разряд был зафиксирован в радиусе 208 км от радара, нахождение

элемента матрицы соответствующего координатам зафиксированного разряда;

- создание и обнуление переменных, считающих количество положительных и отрицательных разрядов;

- создание переменных, считающих значение среднего, минимального и максимального положительных и отрицательных значений токов;

- прибавление к текущему значению матрицы единицы;

- в зависимости от высоты рельефа, подсчет количества и полярности разрядов;

- в зависимости от полюса разряда, увеличение количества положительных или отрицательных значений разрядов;

- изменение среднего или максимального значения токов;

- подбор данных из базы радиолокационных обзоров по координате и времени фиксации разряда;

- подбор максимального значения отражаемостей в радиусе 3 км от разряда в заданном интервале времени;

- подсчет средних и максимальных значений отражаемостей за месяц;

- по окончании года вывод матрицы в текстовый файл с построением графической карты количества молний типа «облако-земля» (см. рис.2.20);

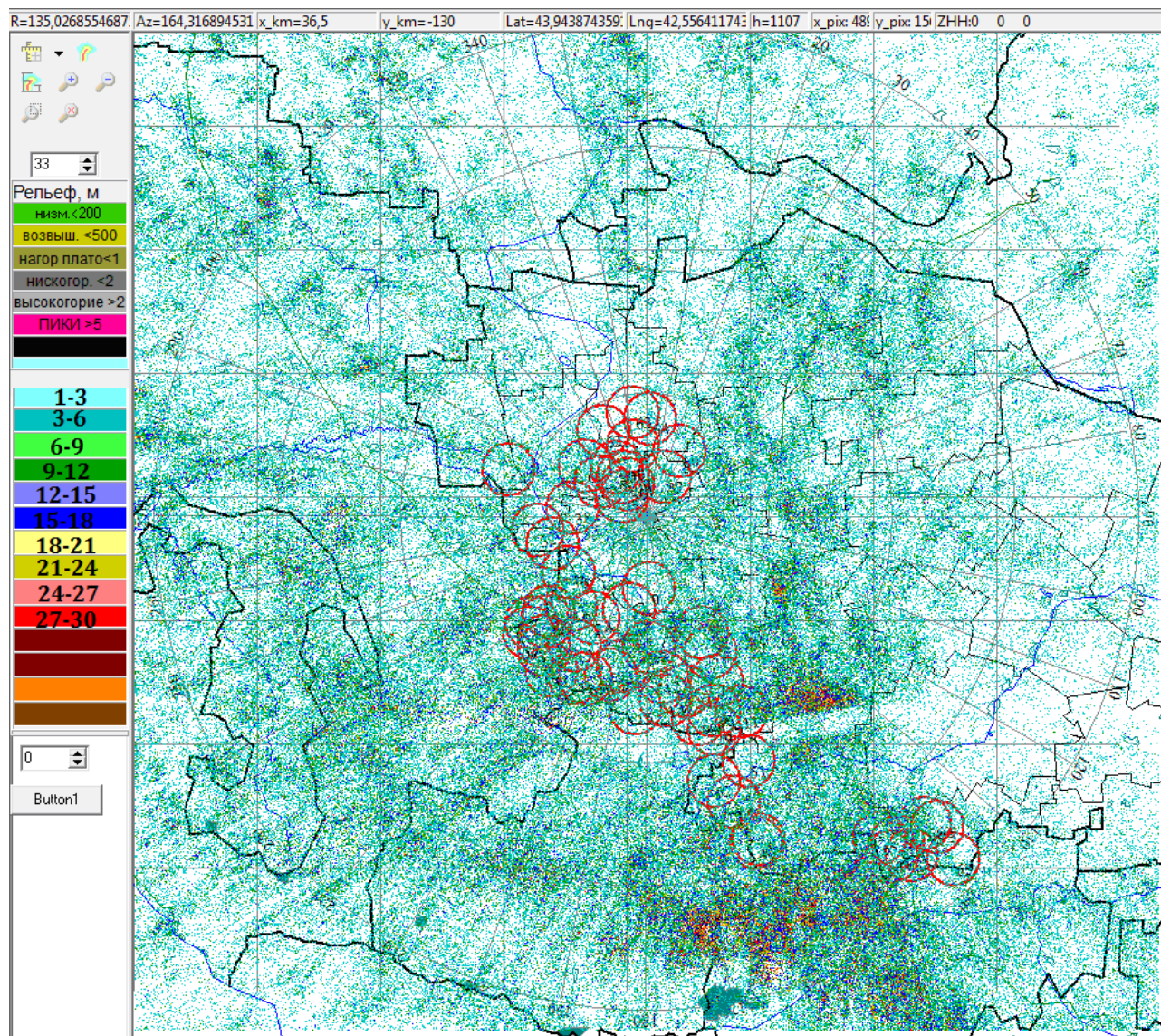


Рис. 2.20 Пример карты годового распределения гроз типа «облако-земля», на карте в радиусе обзора МРЛ

- по полученным данным о количестве молний строят графики количества молний в зависимости от высоты рельефа, определяют наиболее грозо- и градоопасные месяца;
- по картам распределения молний определяют наиболее грозоопасные участки;
- по картам средних значений максимальных отражаемостей гроз, полученных с помощью радиолокатора, определяют наиболее градоопасные участки территории.

## **2.7 Метод автоматического сравнения данных МРЛ и метеопостов сети Росгидромета о суммарных осадках**

В жизни современного общества все актуальнее становятся вопросы безопасности жизнедеятельности, в том числе и предупреждения населения об опасных явлениях погоды – грозах, мощных и катастрофических ливнях, градобитиях и смерчах. Мы живем в эпоху, когда частота опасных явлений погоды нарастает с каждым годом, что фиксируется в документах Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [208, 244-247, 276, 280, 293]. Особое место при решении этой задачи занимают средства дистанционного зондирования, обеспечивающие оперативный контроль опасных явлений погоды на значительных территориях [99]. Наземные наблюдения за погодой на метеостанциях решить эту задачу в полном объеме не в состоянии из-за относительной разреженности наблюдательной сети и могут использоваться только для контроля и валидации дистанционных наблюдений [73,74,76]. В России с 2012 г. начато развертывание сети современных метеорологических радиолокаторов [10,84,225], задачей которых является, в частности, идентификация явлений погоды, в том числе опасных, получение сумм выпавших осадков и построение объединенных карт этих и других, получаемых с помощью ДМРЛ, данных.

Для успешного решения задач очень важна валидация радиолокационных наблюдений по данным независимых метеорологических наблюдений (эталонов), таких как наблюдения за явлениями погоды на метеостанциях, регистрация времени и координат молниевых разрядов современными сетями грозопеленгаторов, самолетные наблюдения и др. [176,277,279,281,282].

При этом значительной организационной и технической проблемой является создание автоматизированной системы валидации, которая обеспечивала бы выполнение сбора, накопления наблюдений ДМРЛ и эталонных наблюдательных систем, сопоставление данных наблюдений и анализ полученных результатов [184].

Для сравнения радиолокационных данных сети «ДМРЛ-С» с данными сети метеонаблюдений, разработана программа «RadMet.exe», обеспечивающая автоматическое построение карты заданного региона (например, Северного Кавказа), на которую на фоне административных границ территории наносятся [108,132]:

- позиции гидрометеорологических станций (ГМС);
- суммарный слой осадков по радиолокационным данным «ДМРЛ-С»;
- слой осадков по данным ГМС.

Программа «RadMet.exe» опрашивает 93 страницы официального сайта Гидрометцентра РФ <http://meteoinfo.ru>, с которого берет 12- и 24-часовые данные ГМС об осадках (в 07 и 19 часов по Гринвичу за 24 и 12 часов, соответственно). Эта информация сохраняется в базе данных [108].

Параллельно этому программа «RadMet.exe» при эксплуатации на сети «ДМРЛ-С» должна иметь доступ к собственной базе радиолокационных данных в формате кода BUFR. Считывая архив BUFR файлов ПО «ГИМЕТ-2010», программа «RadMet.exe»:

- формирует собственную базу данных, соответствующих суммарным осадкам за 12 и 24 часа, и уничтожает обрабатываемые файлы в формате BUFR. По этой причине у программы «RadMet.exe» должна быть своя папка со своим набором файлов;
- выбирает в базе радиолокационных данных файл с суммарными осадками за интересующий период [132];
- автоматически ищет соответствующий синоптический срок в базе данных наземных измерений ГМС;
- накладывает одну карту на другую (см. рис. 2.21).

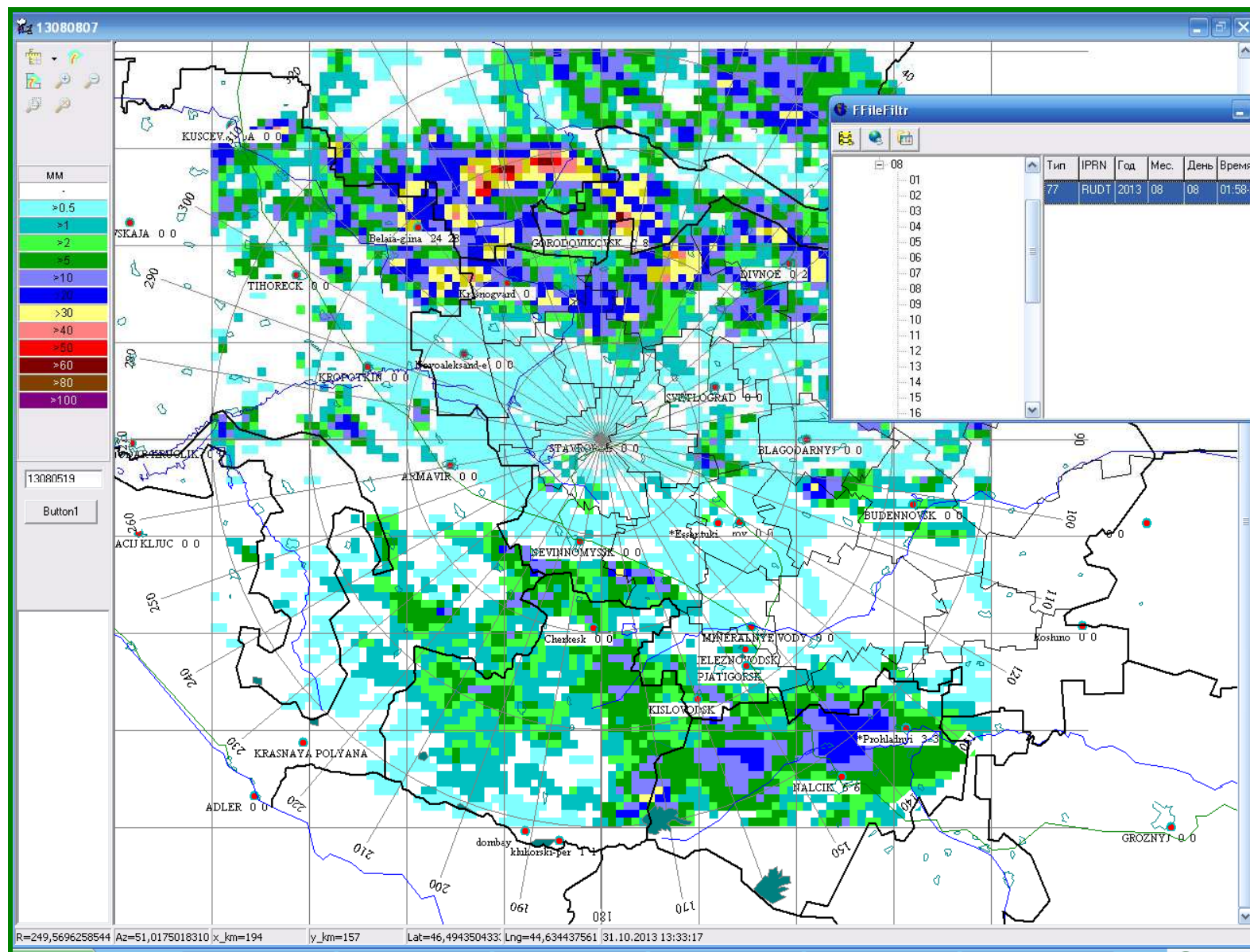


Рис. 2.21 – Пример карты осадков, выпавших 8 августа 2013 г.

Наименование выбранного для сравнения файла об осадках по данным ГМС, загруженного с сайта Гидрометцентра РФ, отображается в левом верхнем углу окна программы (здесь 13080807 означает 2013-й год, 8-й месяц, 8-е число), а соответствующего ему BUFR файла радиолокационных данных – во врезке в правом верхнем углу карты (см. рис. 2.22).

На карте сравнение сумм осадков, выдаваемых программой «RadMet», радиолокационная карта слоя осадков по данным «ДМРЛ-С» отображается в градациях и цветовой палитре (рисунок 3.2), приведенной в левой части карты, а слой осадков по данным метеостанций отображается в цифровом виде после наименований метеостанций. Например, «Belaia Glina 24 28» означает на метеостанции Белая Глина слой осадков за 12 часов (с 00<sup>00</sup> до 12<sup>00</sup> UTC) составил 24 мм, а за 24 часа (с 00<sup>00</sup> до 24<sup>00</sup> UTC) составил 28 мм.

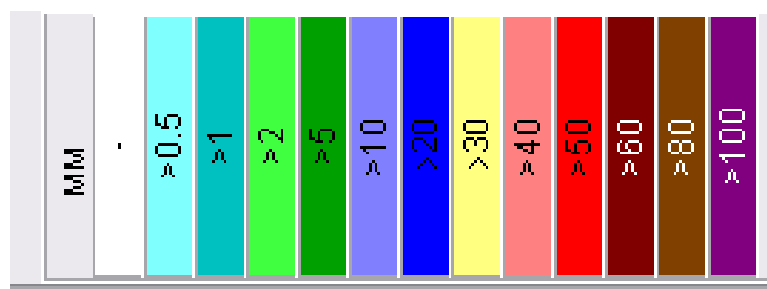
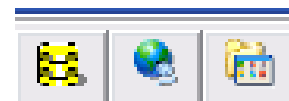


Рис. 2.22 – Шкала градации данных о суммарных осадках

Выбор BUFR файлов для сравнения с данными ГМС осуществляется с помощью панели управления, которая называется FileFiltr и содержит (рисунок 3.3.):

- кнопки проведения сравнения по всем файлам,
- Кнопку, открывающую данные сравнений в текстовом формате;
- левую часть, на которой отображается дата и время последовательности BUFR файлов, принятых из архива «ДМРЛ-С»;
- правую часть, где отображается выбранный для сравнения BUFR файл;



– центральную кнопку, которая инициирует принудительную, внеочередную попытку скачивания данных метеостанций с сайта Гидрометцентра;

– правую кнопку, которая вызывает текстовый файл «Osadki.txt» с результатами сравнения.

Сравнение радиолокационных и наземных данных о слое осадков осуществляется для точки размещения метеостанции с учетом ее географических координат [76]. При этом данные метеостанции сравниваются с радиолокационными данными, рассчитанными из матрицы BUFR файла для конкретного квадрата 4x4 км, где размещена метеостанция [206].

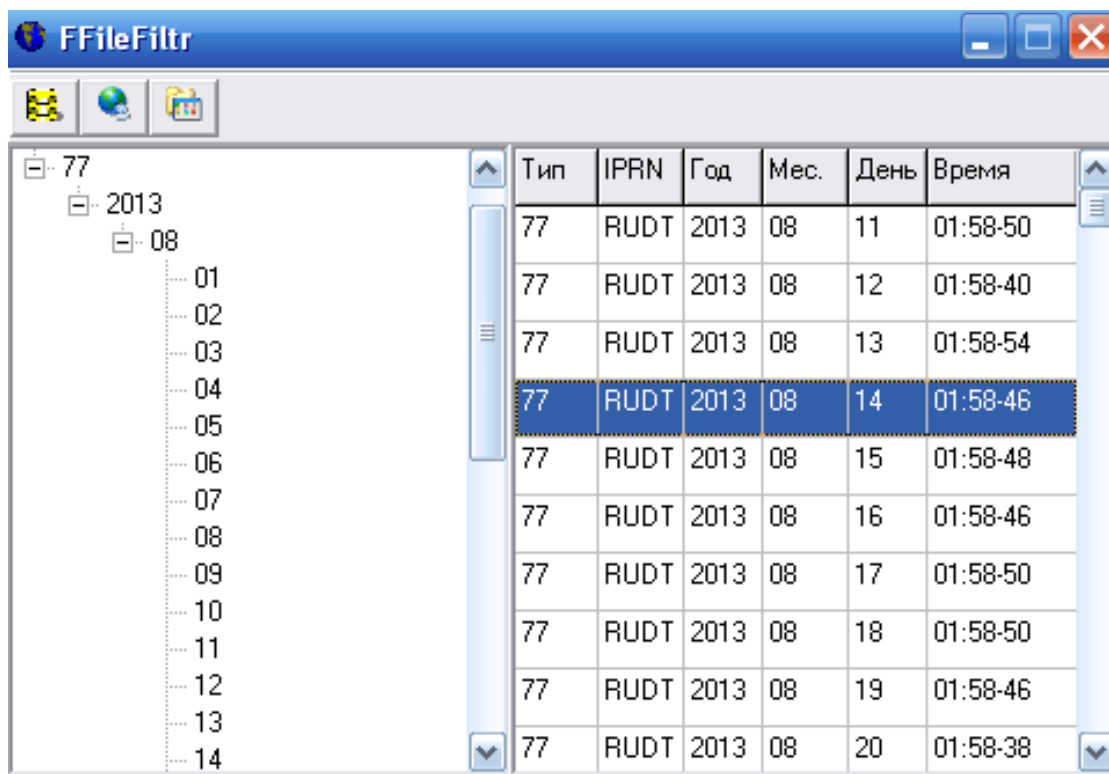


Рис. 2.23 – Панель управления «RadMet.exe»

Программа «RadMet» позволяет сразу провести сравнение множества файлов BUFR. Сначала следует выбрать группу файлов за заданный период времени: для этого выбираем год, месяц или день в левой части и с какого периода нужно рассчитать в правой части, и нажать левую кнопку панели управления (см. рис. 2.23). В результате этого будет проводится последовательное сравнение всех нижерасположенных радиолокационных данных с данными метеонаблюдений.

## ВЫВОДЫ

1. Реализация предложенных выше алгоритмов автоматической идентификации облаков, измерения комплекса их параметров и получения таблиц и графиков временного хода в автоматизированной системе «АСУ-МРЛ» позволило получить мощный инструмент оперативного и всестороннего исследования облачных систем и их КЯ любого региона.

2. С использованием радиолокационной информации на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек был разработан новый метод обнаружения и распознавания фидерных облаков, которые являются объектами воздействия. В основе метода лежит карта высот максимальной отражаемости и рассчитанные на ее основе параметры. Получено, что оптимальным параметром для определения площадки засева является высота максимальной отражаемости, превышающая 5 км при отражаемости менее 20 dBz. Данная методика применима для корректировки существующей оценки физической эффективности и автоматизации воздействия на градовые процессы.

3. На базе метода автоматической идентификации облаков и КЯ были разработаны и реализованы новые методы фильтрации аномального радиоэха, которые предназначены для повышения качества и достоверности метеорадиолокационной информации.

4. С использованием данных грозопеленгационной сети был разработан и реализован новый метод статистического анализа грозовой активности, который позволяет провести автоматизированный анализ обширного материала с целью исследования особенностей пространственно-временного распределения грозовых разрядов, наблюдавшихся в течение многих лет. Данный метод позволяет определять наиболее грозо- и градоопасные области исследуемых территориях, что может применяться для корректирования

выбранных для защиты от града территорий расположения территорий, защищаемых от града.

5. На базе сети метеостанций и постов, имеющих в общем доступе в сети Интернет, был разработан новый метод сопоставления радиолокационных и наземных данных, позволяющий в автоматизированном режиме проводить сравнение радиолокационной и наземной информации, а также анализировать и прогнозировать развитие грозоградовых процессов на подступах к защищаемым территориям.

6. Разработан новый метод автокалибровки МРЛ по эталонному локатору, расположенному в заданной окрестности. Несмотря на достаточно стабильную работу локаторов сети со временем узлы будут изнашиваться, погрешности в измерениях отражаемостей будут расти, этот метод позволит в реальном времени, в автоматическом режиме, контролировать отклонения в работе локаторов.



Из рис. 3.1 следует, что наряду с крупными могут быть идентифицированы даже очень малые по площади КЯ, а их параметры автоматически измеряются и заносятся в таблицы в формате txt, а также обеспечивается построение графиков временного хода за весь период наблюдения каждой КЯ. При этом число идентифицируемых КЯ практически не ограничено.

На рис. 3.2 показан пример выделения КЯ с периметром более 10 км и минимальным значением радиоэха равным 20 dBZ. Остальные ячейки не нумеруются. Таким образом, предусмотрена возможность идентификации КЯ с заданными параметрами (только градовых, только грозовых и т.п.).

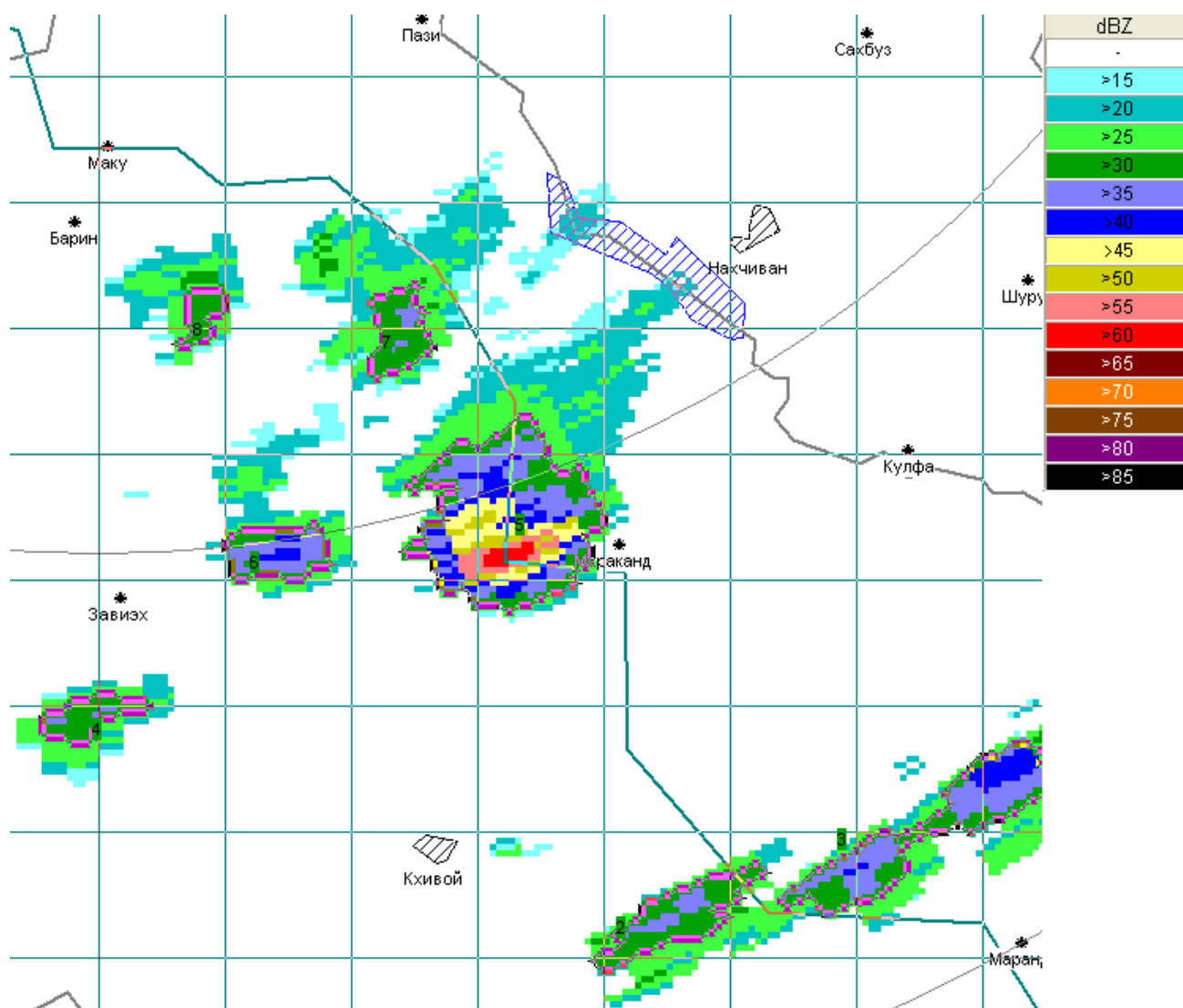


Рис. 3.2 Выделение КЯ в весенний период по данным системы «АСУ-МРЛ» аэропорта «Звартноц-2» г. Ереван, Армения

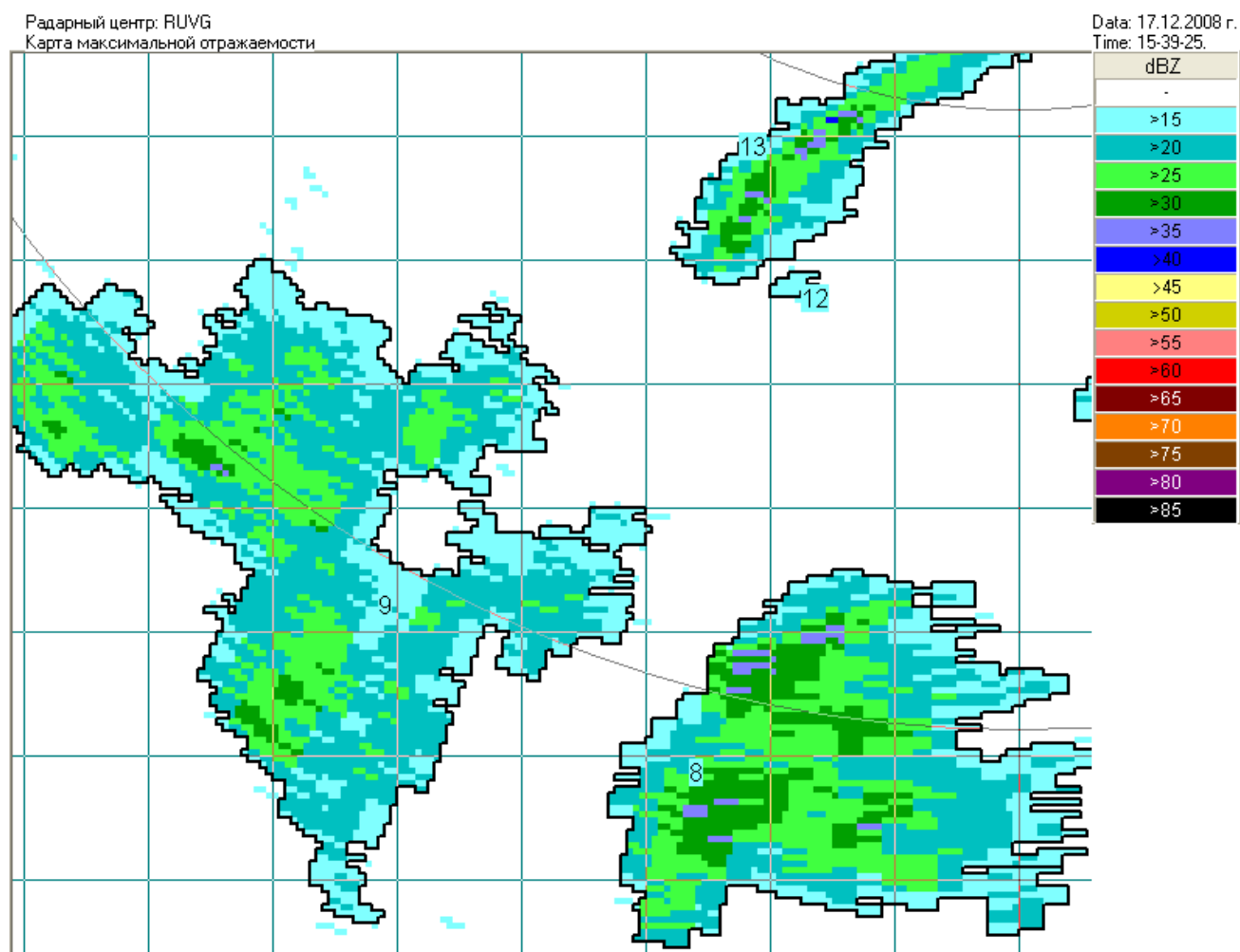


Рис. 3.3 Выделение облачных полей слоистообразной облачности в зимний период с периметром более 10 км и порогом 0 dBZ по данным системы «АСУ-МРЛ» Волгоградского ЦГМС

На рис. 3.3 демонстрируется возможность идентификации облачных систем без выделения облачных ячеек внутри каждой облачной системы, по аналогии с тем, что реализовано в системе TITAN. Это позволяет следить за эволюцией и перемещением облачных систем в целом. При этом можно задавать порог отражаемости, по которому будет выделяться облачная система. В этом случае направление и скорость перемещения облачных систем будут усреднены по всем ячейкам облачной системы, ограниченной полем радиозахвата заданного уровня отражаемости.

Пример автоматического выделения конвективных ячеек при разных погодных условиях подтверждает работоспособность и применимость метода

(см. рис. 3.4, рис. 3.5).

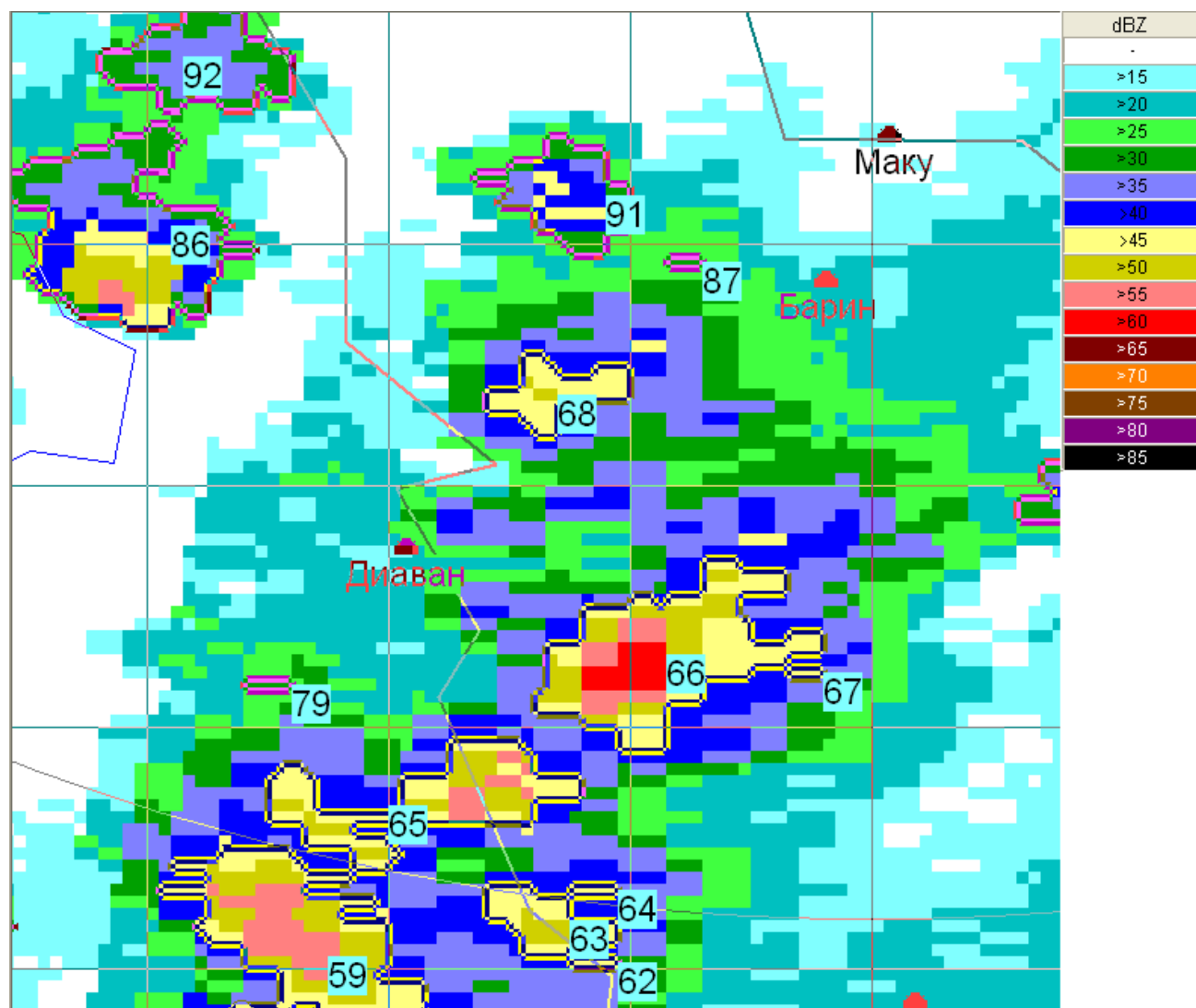


Рис. 3.5 Выделение КЯ в осенний период по данным Ставропольского МРЛ с периметром поля ячейки более 10 км и порогом отражаемости 15 dBZ

### 3.2. Оценка степени градоопасности облака по данным МРЛ

Согласно [209, 223, 224, 229, 237] степень градоопасности облаков повышается по мере увеличения радиолокационной отражаемости  $Z$ , высоты верхней границы области повышенной отражаемости  $\Delta H_{35}$  и  $\Delta H_{45}$ , приведенной (интегрированной по высоте) и интегральной (интегрированной по объему) водности переохлажденного слоя облаков, где происходит зарождение и рост града. В связи с этим распознавание градовых, градоопасных и потенциально градоопасных облаков и категорий объектов

воздействия (ОВ) осуществляется на основе измерений комплекса одномерных, двумерных и трехмерных параметров КЯ [19], характеризующих наличие повышенного водосодержания облачного слоя выше изотермы 0°C по критериям, приведенным в таблице 3.1,

Таблица 3.1 Критерии распознавания категорий объектов воздействия [19].

Категории ОВ	Критерии градоопасности			
Потенциально градоопасные	$0 < \Delta H_{Z_m} < 4 \text{ км}$	$15 < Z_m < 45 \text{ dBZ}$	$\Delta q_m > 1 \text{ кг/м}^2$	$\Delta M_{25} > 10^3 \text{ т}$
Градоопасные	$\Delta H_{35} > 3,0 \text{ км},$ $\Delta H_{Z_m} > 0$	$Z_m \geq 45 \text{ dBZ}$	$\Delta q_m > 2 \text{ кг/м}^2$	$\Delta M_{35} > 5 \cdot 10^4 \text{ т}$
Градовые	$\Delta H_{45} \geq 3 \text{ км}$	$Z_m \geq 55 \text{ dBZ}$	$\Delta q_m > 4 \text{ кг/м}^2$	$\Delta M_{45} > 10^5 \text{ т}$
Сверхмощные градовые	$\Delta H_{45} > 4 \text{ км}$	$Z_m > 65 \text{ dBZ}$	$\Delta q_m > 8 \text{ кг/м}^2$	$\Delta M_{55} > 5 \cdot 10^5 \text{ т}$

где  $\Delta H_{Z_m}$  - высота максимума радиоэха над уровнем изотермы 0°C;  $Z_m$  - максимальная отражаемость КЯ на длине волны  $\lambda = 10 \text{ см}$ ;  $\Delta H_{35}$  и  $\Delta H_{45}$  - высота верхней границы объема с  $Z_{10} = 35$  и  $45 \text{ dBZ}$  над уровнем изотермы 0°C;  $\Delta q_m$  - максимальное значение приведенной водности облачного слоя выше уровня изотеры 0°C;  $\Delta M_{Z_i}$  - интегральная водность объема КЯ, ограниченного значением  $Z_i$ , выше уровня изотермы 0°C.

Распознавание вида осадков, явлений погоды, включая оценку степени грозо- и градоопасности КЯ осуществляется по комплексу параметров в соответствии с руководящими документами [20,210] по критериям, представленным в таблице 3.2

Таблица 3.2 Критерии распознавания вида осадков и явлений погоды

Вид явления (градация)	Критерии распознавания					
	$Z_1$ , dBZ	$Z_2$ , dB Z	$Z_3$ , dBZ, $\Delta H_{тр}$ , км	$Y=$ $0,1H_B \cdot Z_3$	$Z_m$ , dBZ	$\Delta H_{45}$ , км
Обл. верх. и средн. яруса	$Z < 7$ на высотах более 2 км					
Слоистообразная	$5 < Z < 15$ по всем высотам					
Осадки слабые: - хол. период ( $H_0 < 0,5$ км); - теп. Период ( $H_0 \geq 0,5$ км).	7 - 21 7 - 23					
Осадки умеренные - хол. период ( $H_0 < 0,5$ км); - теп. период ( $H_0 \geq 0,5$ км).	21 - 26 23 - 30					
Осадки сильные: - хол. период ( $H_0 < 0,5$ км); - теп. период ( $H_0 \geq 0,5$ км).	$Z_1 > 30$ $Z_1 > 35$					
Конвективные облака		$\geq 27$				
Ливни слабые	35 - 40					
Ливни умеренные	41 - 45					
Ливни сильные	46 - 50			$7 < Y \leq 9$		
Гроза с $P > 50\%$			$28 \leq Z_3 < 31$	$10 \leq Y < 12$		
Гроза с $P > 70\%$			$31 \leq Z_3 < 34$	$12 \leq Y \leq 13$		
Гроза с $P > 90\%$			$34 \leq Z_3 < 45$	$Y > 13$		
Град слабый					$45 < Z_m \leq 55$	$> 3$
Град умеренный					$55 < Z_m \leq 65$	$> 3$
Град сильный					$Z_m > 65$	$> 4$
Шквал с $V_{ш} > 15$ м/с			$Z_3 \geq 39$ , $\Delta H_{тр} > 3$ км			
Шквал с $V_{ш} > 20$ м/с			$Z_3 \geq 44$ $\Delta H_{тр} > 3$ км			

где  $Z_1$  (dBZ) - радиолокационная отражаемость на высоте  $H = 1$  км;  $Z_2$  - радиолокационная отражаемость на высоте изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $H_0$  °C);  $Z_3$  - радиолокационная отражаемость на высоте  $H_0 + 2,5$  км ( $H_3$ );  $\Delta H_{\text{тр}} = H_B - H_{\text{тр}}$  - превышение высоты верхней границы облака  $H_B$  над уровнем тропопаузы  $H_{\text{тр}}$ ;  $Y = 0,1H_B \cdot Z_3$  – комплексный критерий грозовой опасности ГГО им. А.И. Воейкова [93,243].

На рис. 3.7 представлен пример карты явлений погоды с нумерацией КЯ, указанием направления и скорости перемещения, получаемой по одиночным циклам радиолокационного обзора пространства. Справа от цветного изображения КЯ № 1 - 4 показана таблица основных параметров КЯ № 1 с автоматическим распознаванием степени градоопасности (категории ОВ), вида явлений погоды (град умеренный). Справа таблицы параметров автоматически отображается штормовая таблица с указанием вида явлений (гроза, град) и их координат, служащая для решения задач метеобеспечения авиации. Над штормовой таблицей показан вертикальный разрез КЯ № 1.

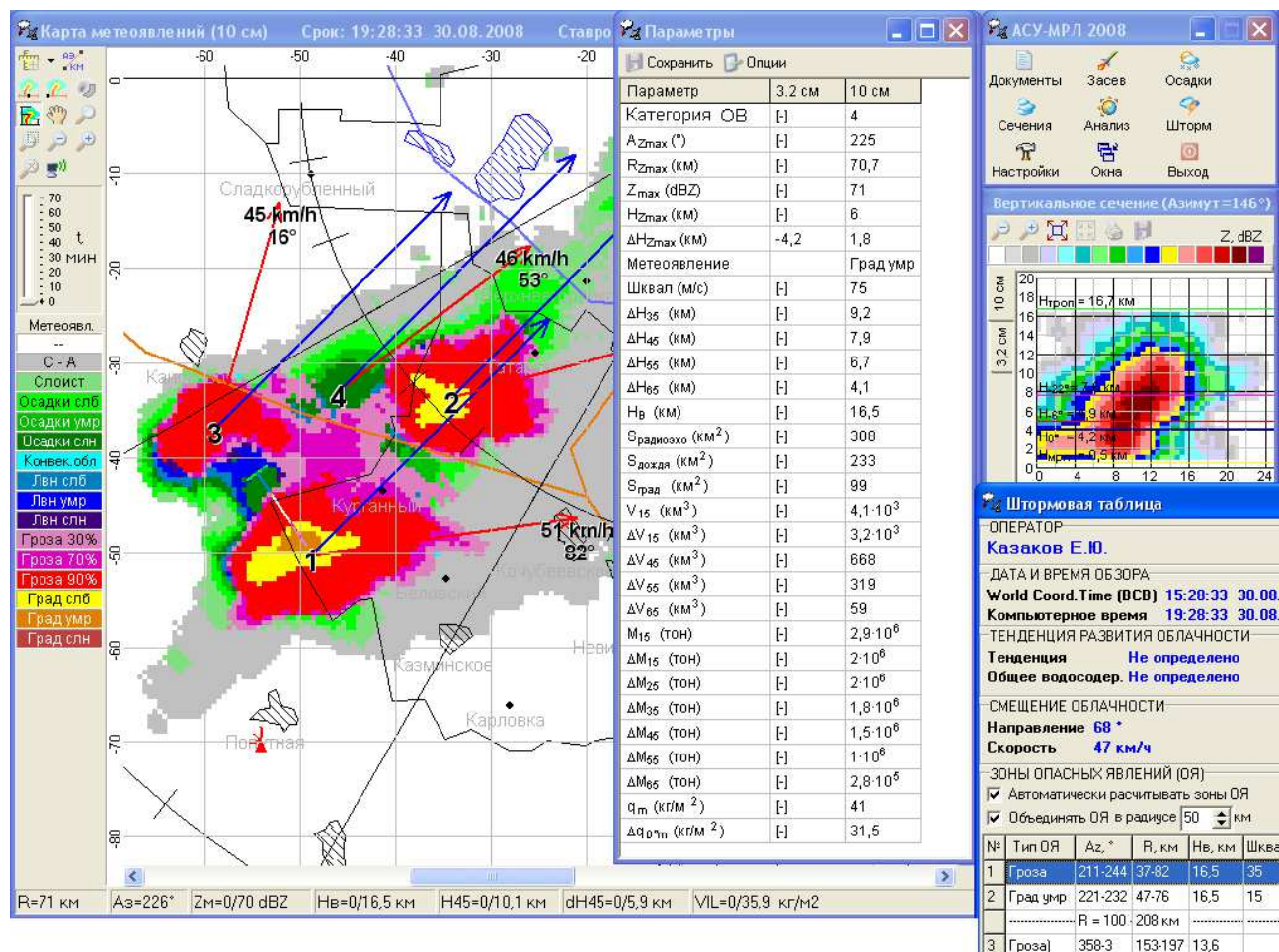


Рис. 3.7 Карта явлений погоды с нумерацией КЯ, таблицей основных параметров КЯ и оценкой грозо- и градоопасности КЯ № 1 в 19<sup>28</sup>, 30.08.2008г.

Анализ рис. 3.7 показывает, что предлагаемый метод и алгоритмы позволяют реализовать комплексную оценку метеорологической обстановки в реальном масштабе времени.

### 3.3 Проверка метода идентификации навеса радиоэха градовых облаков.

Как показывает практика, по ходу перемещения градового облака на более низкой высоте, чем само градовое облако, сосредоточены так называемые фидерные облака, имеющие достаточно высокий водозапас [1,19], которые, втягиваясь в восходящие потоки смещающегося градового облака, затягиваются в верхнюю его часть, где формируется град, и постоянно

подпитывают его. Вследствие такой подпитки градовое облако начинает быстро расти в размерах.

Согласно концепции ускорения осадкообразования [7,19], являющейся физической основой современной российской технологии воздействия на градовые процессы, необходимо стимулирование более раннего и быстрого осадкообразования в областях будущего градообразования, чем при естественном ходе процесса. Сокращение времени формирования осадков может приводить к нарушению баланса скоростей, необходимому для поддержания зародышей града в зоне роста. Зоной формирования условий для зарождения града является переохлажденная часть области нового роста, где происходит формирование условий для зарождения града (преимущественно конденсационный и зарождающийся коагуляционный рост облачных частиц). Она расположена в фидерных облаках несимметричных градовых ячеек и во вновь развивающихся конвективных ячейках одначейковых процессов в интервале температур  $-5^{\circ}\text{C} - -20^{\circ}\text{C}$  и имеет отражаемость  $Z_{10} < 15 \text{ dBZ}$ . Однако наши исследования показывают, что в зоне формирования отражаемости достигают  $20 \text{ dBZ}$  [123].

Стадия формирования условий для зарождения града, на которую направлено воздействие с целью нарушения баланса скоростей, необходимых для поддержания зародышей града в зоне роста, является длительной стадией (20-30 мин) [16]. При этом скорость восходящего потока фидерных облаков прямо пропорциональна скорости главного восходящего потока, так как чем мощнее облако, тем выше в нем вертикальные скорости. Логично было бы предположить, что максимальная отражаемость в столбе зоны формирования естественных зародышей будет стремиться к увеличению по мере роста частиц. В результате, чем длиннее путь частицы до слияния с главной конвективной ячейкой, тем дольше у нее стадия роста за счет конденсации и коагуляции. В исследованиях менялись пороговые значения высот и пороговые значения отражаемостей. При значениях высот 5-6 км и отражаемости менее  $20 \text{ dBZ}$  наблюдалось 87% совпадение с месторасположением площадок, выделенных в

ручном режиме [123]. При этом в подавляющем большинстве случаев площадь, выделенная в автоматическом режиме, превышала площадь, выделенную в ручном режиме, не более чем на 30 %.

Так после идентификации КЯ и определения по характеристикам принадлежности к ОВ идентифицируется площадка засева. Как известно, фидерные облака расположены в интервале температур  $-5^{\circ}\text{C}$  –  $-20^{\circ}\text{C}$  и имеют отражаемость  $Z_{10} < 15$  dBZ. Если высота максимальной отражаемости в наборе точек, входящих в КЯ, превышает уровень 5 км при отражаемости менее 20 dBz, то эту область принимают за навес радиозеха [123].

Исследования проводились на метеорологическом радиолокаторе МРЛ-5, работающем на длине волны 10,15 см с несущей частотой  $2950 \pm 15$  МГц, расположенном в пригороде Ставрополя (45,11 с.ш., 42,106 в.д., высота над уровнем моря 453 м). При работе радиолокатора применялось программное обеспечение АСУ-МРЛ, которое формирует объемный файл обзора с шагом по азимуту 1 градус, по углу места 0,52 км и 18 углам места. Основное количество исследуемых случаев активного воздействия на градовые процессы фиксировалось системой АСУ-МРЛ. Под объемным файлом обзора понимаются первичные данные, полученные в результате сканирования локатором пространства с определенным шагом по азимуту, углу места и дальности. В различных автоматизированных системах используются различный шаг сканирования, алгоритмы и методики расчета радиолокационной отражаемости, которые учитывают поправки на ослабление сигнала, кривизну земли, потерю сигнала в волновом тракте локатора и т.д. Каждая автоматизированная радиолокационная система имеет собственный формат первичных данных, которые не воспринимаются другими системами без конвертера. Как следствие, каждая автоматизированная система использует собственные алгоритмы обработки и визуализации радиолокационной информации, предлагая пользователю определенный стандартный набор карт и опций. Пользователь не имеет доступа к первичным данным, а пользуется переработанной информацией, при этом не обладая возможностью вводить

изменения в алгоритмы расчета или формировать новые карты. Главным инструментом исследования в данной работе является новый программный комплекс АСУ-ГРАД, представляющий собой мощный инструмент исследования макро- и микроструктуры облаков. Данный комплекс осуществляет считывание и обработку данных различных автоматизированных систем, таких как АСУ-МРЛ, АСУ-Антиград, Мерком. Целью создания данной системы являются экспериментальные исследования метеообъектов, внедрение новых, нестандартных методик и технологий в противоградовых системах и сравнение данных с различных автоматизированных систем. Для этого нами разработаны конвертеры форматов объемных (первичных) файлов обзора от систем АСУ-МРЛ, АСУ-Антиград и Мерком и реализована методика автоматической идентификации конвективных ячеек [105].

Используя метод автоматической идентификации, было проанализировано 173 случая воздействия на градовые процессы, развивавшиеся на территории Ставропольского края. В 141 случае область навеса радиоэха автоматически выделенных конвективных ячеек более чем на 80% соответствовала выделенным в ручном режиме. При этом эффективность воздействия Ставропольской ВС в периоды, из которых выбирались исследуемые случаи воздействия, а именно с 2007 по 2011 гг., не опускалась ниже 95%. Анализ этих процессов позволил выявить оптимальную формулу для автоматического выделения области засева. Область засева можно считать оптимальной при высоте максимальной отражаемости выше 5-6 км. В целом данная методика показала, что в подавляющем большинстве случаев наблюдается почти полное сходство результатов (см. рис. 3.8).

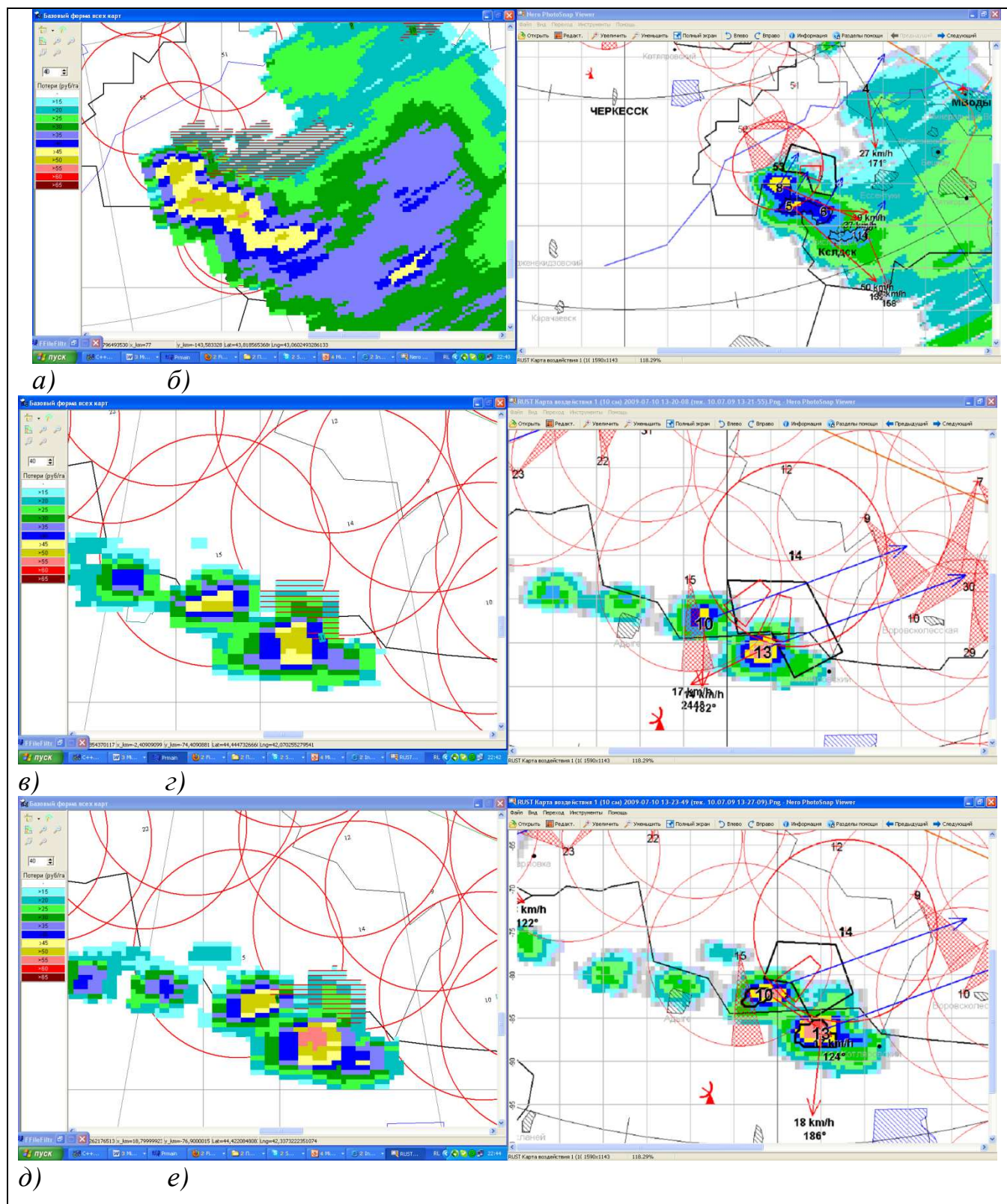


Рис. 3.8 Автоматически выделенные области засева (а, в, д), ручное реальное воздействие на эти же ячейки (б, г, е)

На рисунке слева приводится картинка автоматического выделения красными полосами области воздействия, а справа – реально проведенное воздействие за тот же цикл обзора в ручном режиме Ставропольской ВС (см. рис. 3.8).

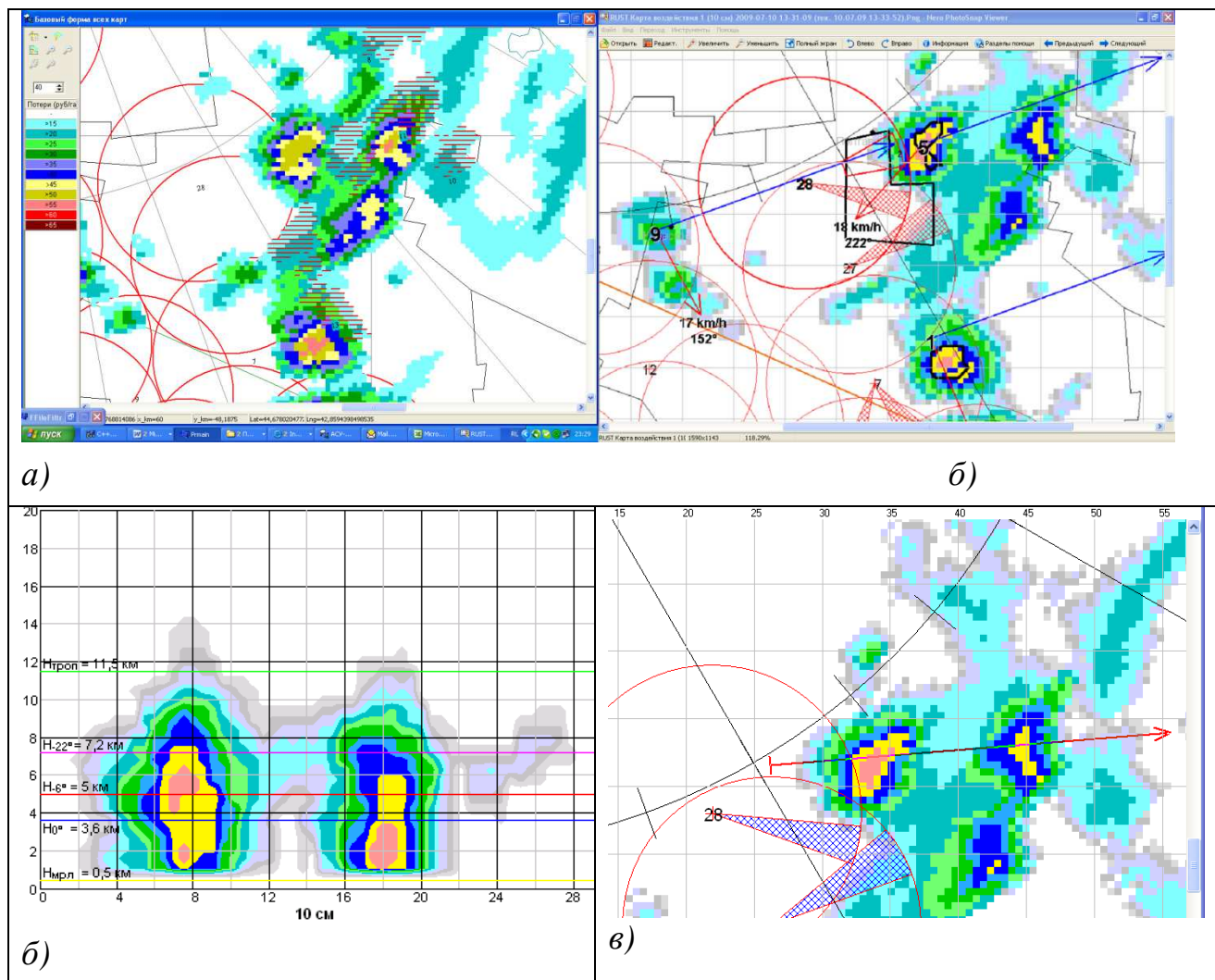


Рис. 3.9 Навес радиоэха, выделенный автоматически (а) и в ручном режиме оператором при реальном засеве (б). Вертикальный разрез по высоте (в) и на плоскости (г)

В большинстве случаев расхождение автоматического и ручного метода являлось следствием ошибочного выделения области воздействия именно в ручном режиме. Как показано на рисунке 3.9 а, область засева захватила и левую часть верхнего облака. На рисунках 3.9 б и 3.9 в видно, что зона навеса радиоэха находится не слева, а между облаками, что и распознал автоматический метод. Ввиду того, что облако находилось на выходе защищаемой территории, то воздействующим не оставалось ничего, кроме как

обстрелять часть, находящуюся в зоне досягаемости ракет площадки воздействия.

### **3.4. Проверка метода автоматической калибровки радиолокационной сети по эталонному локатору**

После решения задачи выделения и нахождения равноудаленных КЯ решается задача автоматического измерения их параметров. В существующих автоматизированных радиолокационных системах [19] для измерения параметров ячейки нужно вручную локализовать КЯ, выделив ее периметр, в пределах которого далее автоматически рассчитываются параметры КЯ путем сканирования всех точек пространства от уровня стояния радиолокатора до высоты 20 км над уровнем моря.

Автоматическое выделение КЯ исключает необходимость ручной локализации КЯ и дает координаты проекции КЯ на горизонтальную плоскость, по которым сканируется требуемая область пространства и в соответствии с [184] измеряется около 100 одномерных, двумерных и трехмерных параметров каждой КЯ, которые записываются в накапливаемую за весь период наблюдений таблицу параметров. Но для корректировки константы локатора нами были использованы всего 2 характеристики: максимальная отражаемость и высота максимальной отражаемости. Для реализации методики сравнения данных двух локаторов осуществляется:

- в автоматическом режиме отслеживаются облака, максимальное значение отражаемости которых попадает в среднюю зону;
- автоматически подбирается файл обзора на сравниваемом локаторе с синоптическим сроком, отличающимся от соседнего не более, чем на 30 секунд.
- Сравниваются значения максимальной отражаемости ( $Z_{max}$ ) и высоты максимальной отражаемости ( $H_{zmax}$ ).
- Далее предлагаются две методики расчета погрешности показаний отражаемости поверяемого локатора относительно эталонного:
  - Расчет отклонения по среднему значению  $\frac{dZ}{dH + 1}$ .

- Расчет среднего отклонения по  $dZ$  при  $dH$  менее 3 км.

Значение  $dH$  является важным параметром, характеризующим насколько идентично распознана область максимальной отражаемости в облаке с двух локаторов. Идеальным условием того, что два локатора видят максимальную отражаемость в одной и той же области облака, является условие, что  $dH$  равно нулю, так как для калибровки используются облака, равноудаленные от двух локаторов.

Для проверки метода автокалибровки по эталонному локатору, были проведены исследования характеристик КЯ равноудаленных от двух локаторов расположенных в г. Зеленокумск и г. Ставрополь [100].

Таблица 3.3 Сравнение характеристик Зеленокумского и Ставропольского локаторов

Дата	Локатор	Время	$Z_{max}$	$H_{zmax}$	$dZ$	$dH$
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

Из таблицы 3.3 видно, что на Зеленокумском локаторе (RUJS) данные занижены относительно эталонного Ставропольского локатора (RUST) по

первой методике на 2 dBz, а по второй методике на 3 dBz. После калибровки поверяемого лоатора его принимают за эталонный, что позволяет проводить сравнения с другими лоаторами сети.

На рис.3.10 приводится график всех случаев за 2010 год, в независимости от уровня отражаемости конвективных ячеек, максимальное значение отражаемости которых попало в среднюю зону, и синоптические сроки не отличались бы более чем на 1 минуту. Анализ данных о погрешностях показал, что несмотря на то, что в 2010 году в ручном режиме проводилась калибровка Зеленокумского лоатора и вводилась корректировка константы лоатора, автоматический режим обнаружил тенденцию к незначительному занижению показаний Зеленокумского лоатора относительно Ставропольского [127].



Рис. 3.10. Разница в значениях максимальной отражаемости dZ (розовая кривая) и его отношения на параметр высоты (синяя кривая) равноудаленных облаков, измеренных эталонным и поверяемым лоаторами по данным за 2010 г.

### 3.5 Проверка метода автокалибровки радиолокационной сети по данным метеостанций и постов

Проведенные сравнения радиолокационной информации и данных наземных метеостанций и постов были рассчитаны по формуле:

$$S = \frac{|Q_O - Q_R|}{|Q|} * 100, \text{ где } Q_O, Q_R - \text{ количество осадков по данным МРЛ и}$$

наземных станций и постов, соответственно.

Расчеты, приведенные в приложении 4, показали, что средняя погрешность измерения осадков, которые удалось получить для сравнения и от Ставропольской ВС, и от Волгоградского ЦГМС в случае 12-и и 24-х часовых суммарных осадков равны  $S_{12\text{сред}}=67,8\%$ , и  $S_{24\text{сред}}=56,4\%$ .

Примеры карт сравнения слоя осадков, измеренных Волгоградским и Ставропольским «ДМРЛ-С» и сетью метеостанций Северного Кавказа, приведены на рисунках 3.11 – 3.14. На этих рисунках видно, что при общем согласии данных имеют место и расхождения слоя осадков, измеренных «ДМРЛ-С» ( $Q_R$ , мм) и метеостанциями ( $Q_M$ , мм).

Причинами таких расхождений, согласно [126,145] могут быть:

- а) неточность калибровки «ДМРЛ-С»;
- б) некорректный учет ослабления радиоволн в волноводном тракте, ветрозащитном укрытии, атмосферных газах, облаках и осадках [86];
- в) неточность используемого корреляционного соотношения  $Z - I$ ;
- г) удаление радиолуча от поверхности земли и перелет луча над зоной осадков на больших удалениях;
- д) уширение радиолуча с расстоянием;
- е) аномальная рефракция радиоволн;
- ж) несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравниваемого слоя осадков;
- з) наличие углов закрытия обзора и др.

Логический анализ возможного влияния этих причин показывает, что первые две причины могут привести к систематическому расхождению значений  $Q_R$  и  $Q_M$  и к тем большим ошибкам, чем больше ошибка в определении константы (метеорологического потенциал ДМРЛ) и ослабление радиоволн в ветрозащитном укрытии (в период дождя) и в осадках.

Третья причина также может привести к систематическим расхождениям, но при разумном выборе  $Z - I$  соотношения, они обычно меньше, чем влияние других причин, рассмотренных ниже.

Причины д) – з) обычно приводят к снижению точности радиолокационного измерения осадков и нарастанию ошибок измерения с расстоянием, которые комментируются ниже.

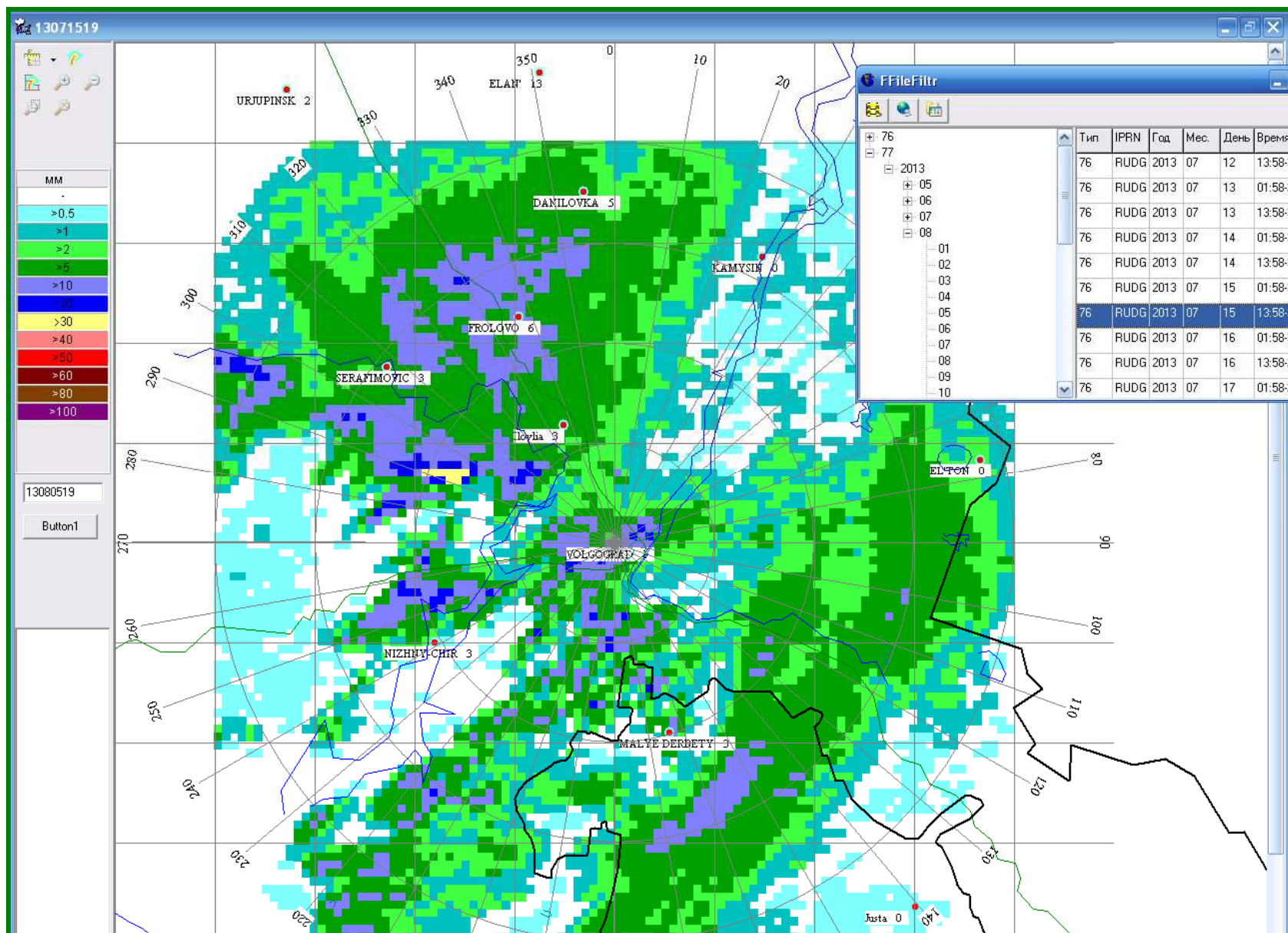


Рис. 3.11 – Карта полусуточных осадков (с 00<sup>00</sup> до 12<sup>00</sup> UTC), выпавших в Волгоградской области 15 июля 2013 г.

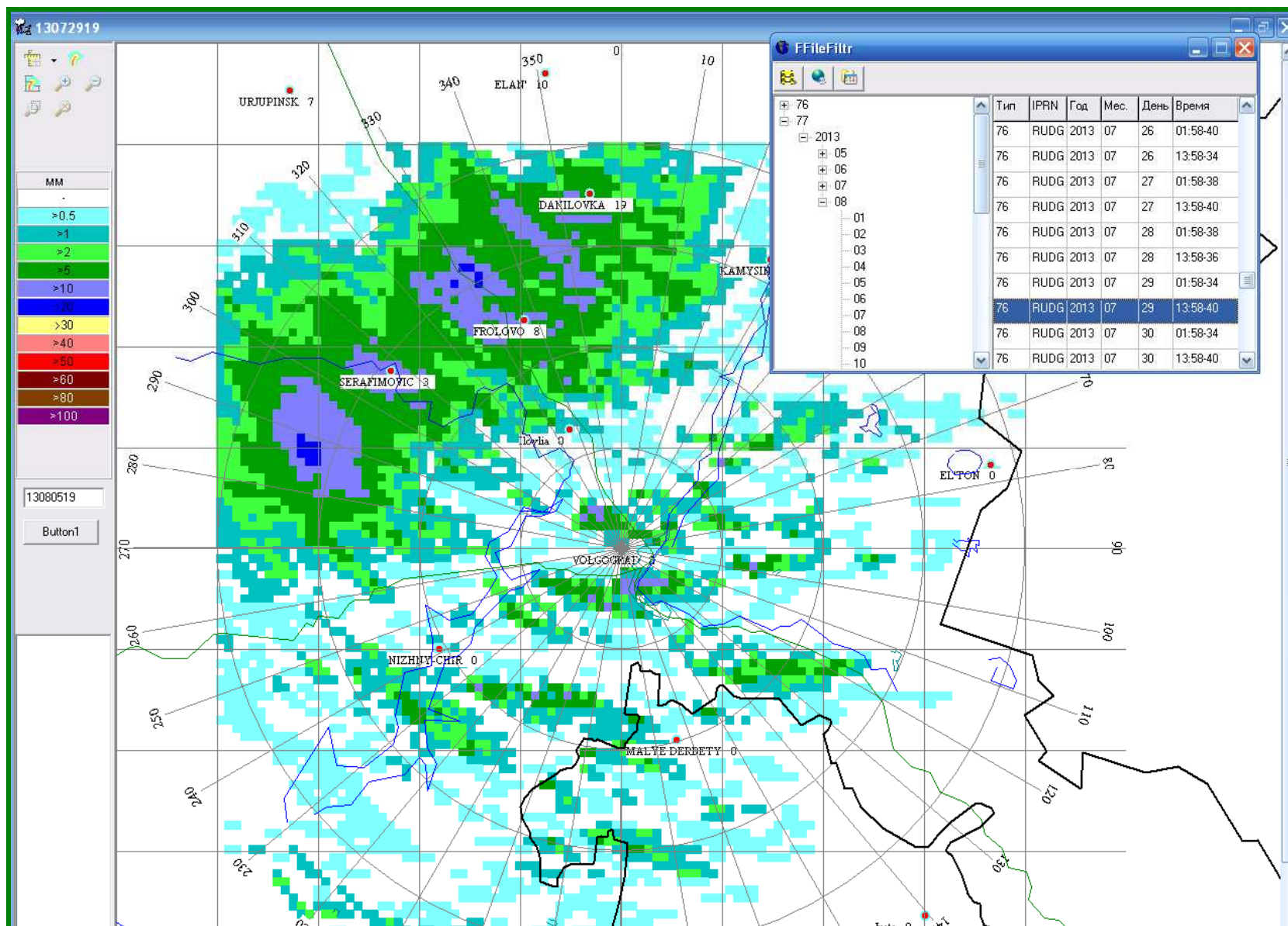


Рис. 3.12 – Карта полусуточных осадков (с 00<sup>00</sup> до 12<sup>00</sup> UTC), выпавших в Волгоградской области 29 июля 2013 г.

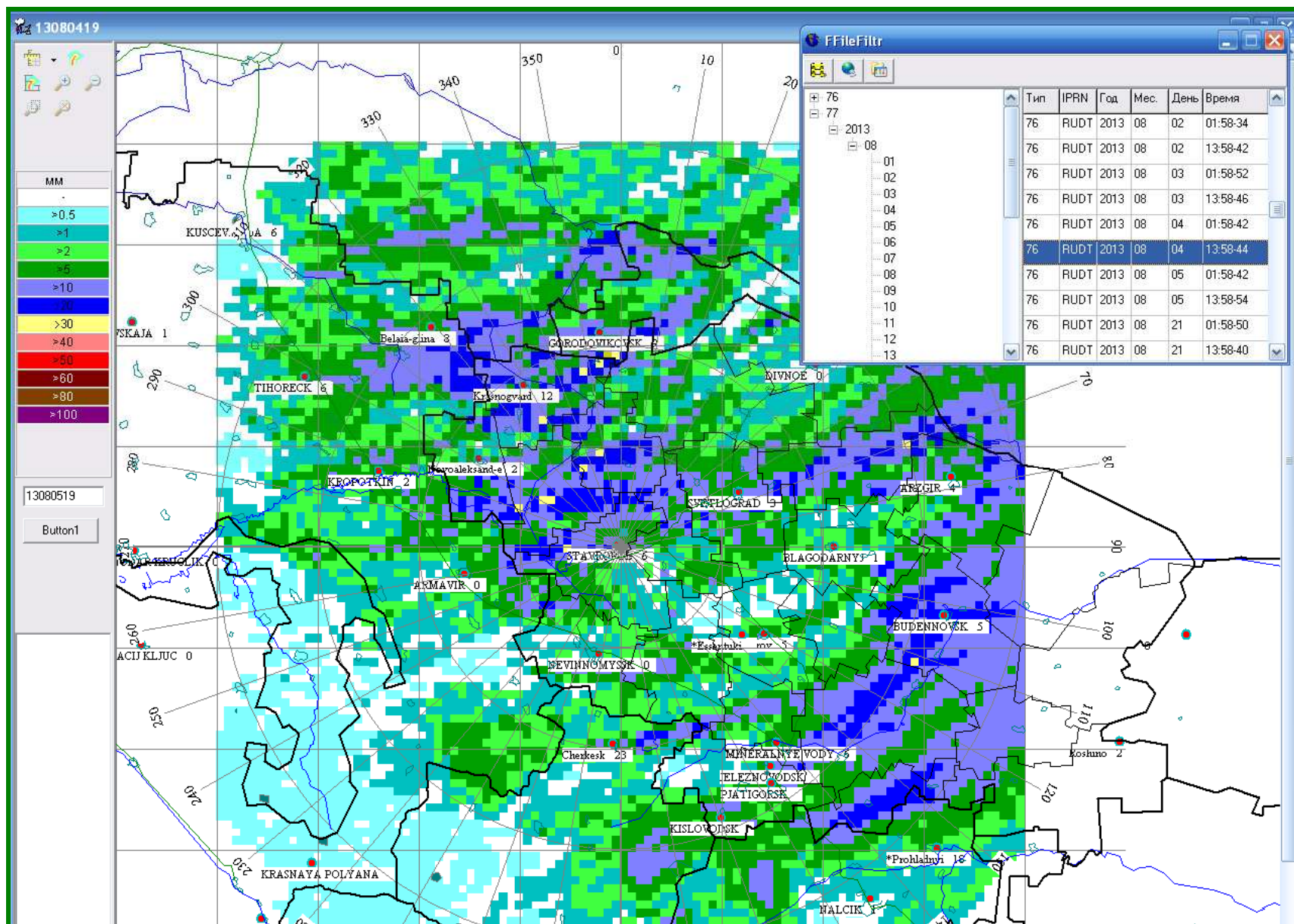


Рис. 3.13 – Карта полусуточных осадков на Северном Кавказе 4.08.2013 г. по данным Ставропольского «ДМРЛ-С».

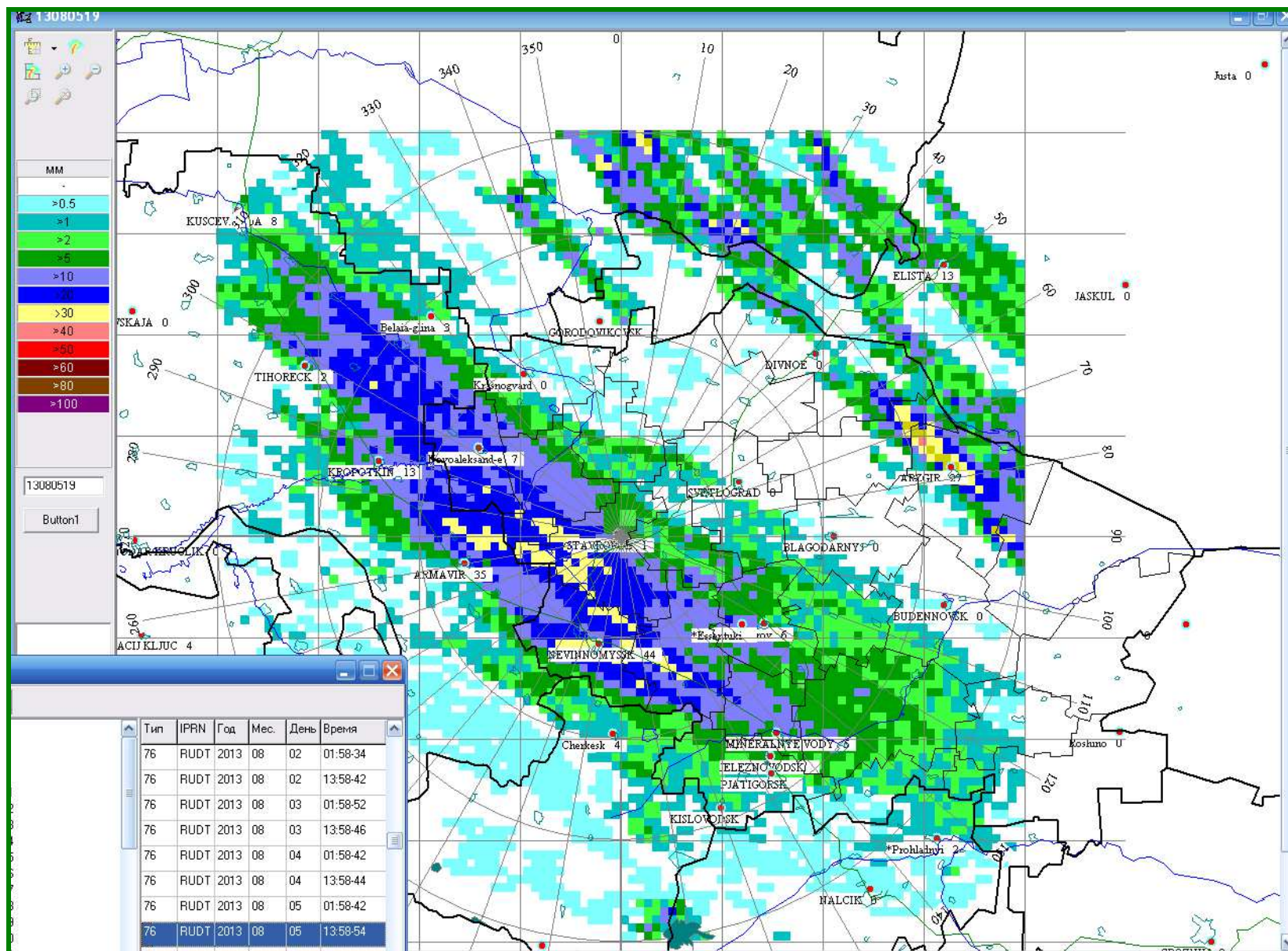


Рис. 3.14 – Карта полусуточных осадков на Северном Кавказе 5.08.2013 г. по данным Ставропольского «ДМРЛ-С».

Несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравниваемого слоя осадков может возникать, например из-за сбоев в передаче данных, а также вследствие ветрового переноса (особенно в случае локальных и неоднородных по площади ливневых осадков).

Наличие углов закрытия обзора является причиной того, что в секторах закрытия радиолокатор не обнаруживает осадки. Это создает серьезные проблемы измерения осадков в горных районах, где почти неизбежно возникают углы закрытия приземного слоя, ограничивающие обзор. Например, Большой Ставропольский хребет высотой 300 – 600 м закрывает обзор Ставропольского МРЛ-5 в западном и юго-западном направлениях на 0,5 – 1,5 градуса. Это приводит к сильному занижению параметров облаков и осадков в этих направлениях, сокращению площади и интенсивности осадков, в том числе и градовых. Когда высота гор превышает толщину приземного в 1 км слоя измерения осадков, над ними и за ними образуются «дыры» в поле осадки. Это же наблюдается в секторах закрытия обзора деревьями, мачтами и другими сооружениями, закрывающими обзор. Размещение МРЛ на подавляющих высотах может решить эту проблему, но не всегда реализуемо из-за отсутствия коммуникаций. Кроме того, при этом требуется обзор при углах ниже горизонта, чтобы обнаружить осадки в ближней зоне (в радиусе до 50 км).

Для получения статистических данных о корреляции радиолокационных и наземных данных, о слое осадков, точности радиолокационного измерения осадков и ее зависимости от расстояния проведен сравнительный анализ выходных данных программы «RadMet» за апрель - август 2013 года.

### **3.5.1 Корреляция радиолокационных и наземных данных**

На рисунках 3.15 и 3.16 представлены графики соотношения результатов радиолокационного и наземного измерений 12-и и 24-х часового слоя осадков в период с апреля по август 2013 г.

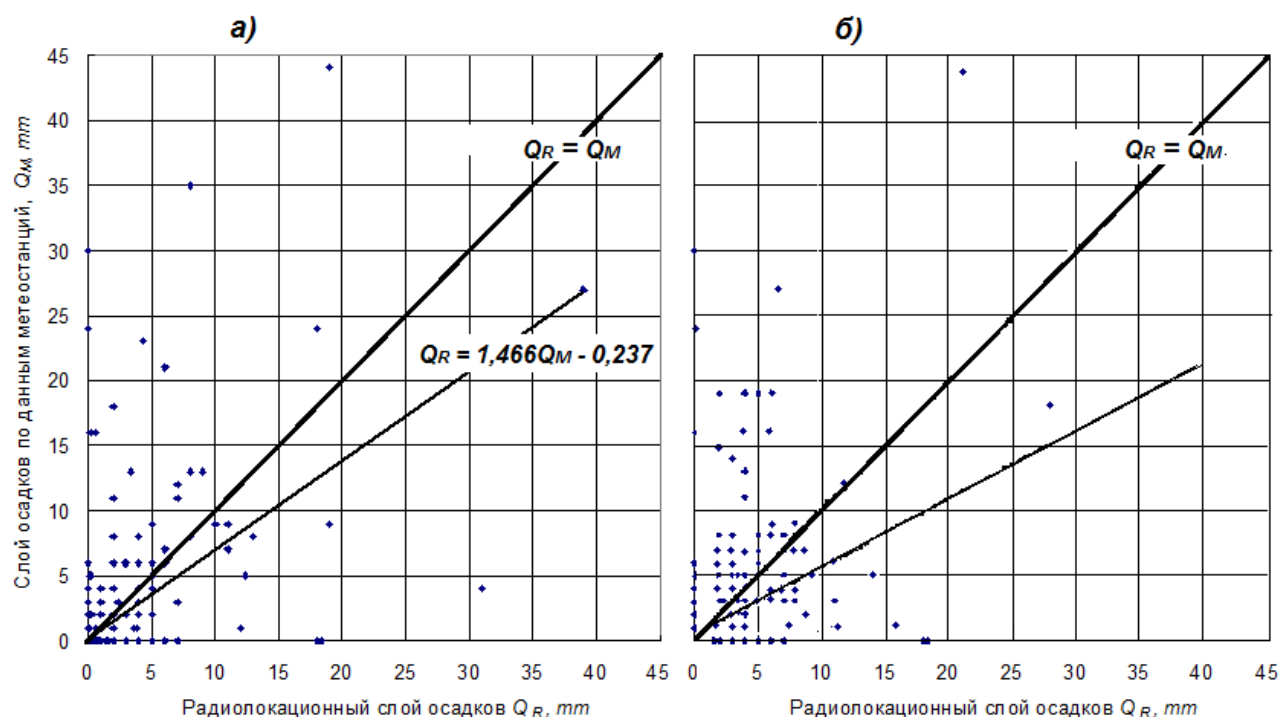


Рис. 3.15 – Слой осадков за 12 часов по данным сети метеостанций ( $Q_M$ ) и «ДМРЛ-С» в городах Ставрополь (а) и Волгоград (б) ( $Q_R$ ). Пунктирная линия – линия тренда экспериментальных данных, а сплошная – линия согласования данных «ДМРЛ-С» и метеостанций

На рисунках 3.15 и 3.16 видно, что разброс значений количества осадков  $Q_M$  и  $Q_R$  довольно существенный, и коэффициент корреляции между ними составляет около 0,45. Наряду со случайным разбросом отмечается также и систематическое завышение количества осадков по радиолокационным данным. Для устранения этого завышения необходимо ввести коррекцию на константы обоих ДМРЛ:

- на Ставропольском «ДМРЛ-С» значение константы следует повысить на 1,23 dB, установив значение  $10\lg C_M = 277,91$  dB, вместо 276,58 dB;
- на Волгоградском «ДМРЛ-С» следует повысить константу на 1,17 dB.

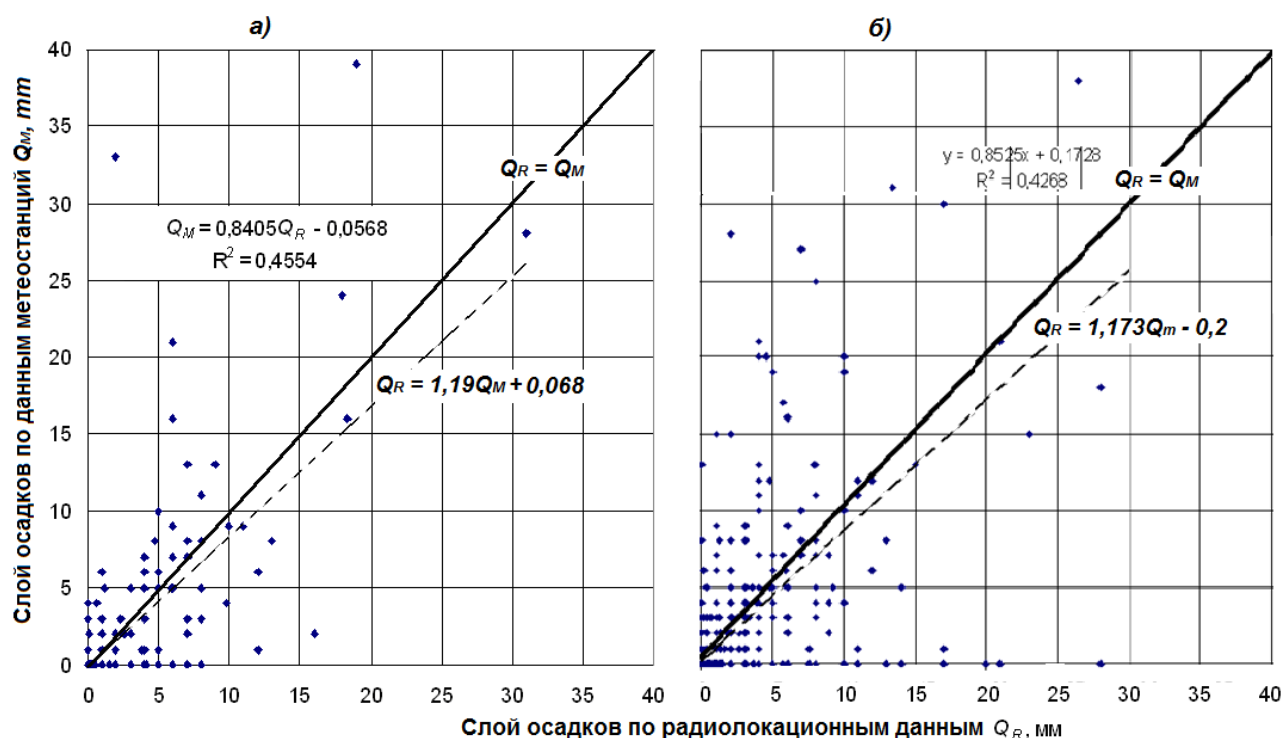


Рис. 3.16 – Слой осадков за 24 часа по данным сети метеостанций ( $Q_M$ ) и данным Ставропольского (а) и Волгоградского (б) «ДМРЛ-С» ( $Q_R$ ). Пунктирная линия – линия тренда экспериментальных данных, а сплошная – линия согласования данных «ДМРЛ-С» и метеостанций

### 3.5.2 Зависимость расхождения $Q_M$ и $Q_R$ от расстояния

Среднее значение отклонения радиолокационных данных о суммарных осадках от данных метеостанций за 12 и 24 часа соответственно представлены на рисунках 3.17 и 3.18. На этих рисунках просматривается тенденция, что радиолокационные измерения ближе к локатору завышают показания относительно данных метеостанций, в промежутке от 70 до 150 км показания локатора наиболее близки показаниям метеостанции, а свыше 150 км радиолокационные измерения отклоняются в меньшую сторону относительно данных метеостанций.

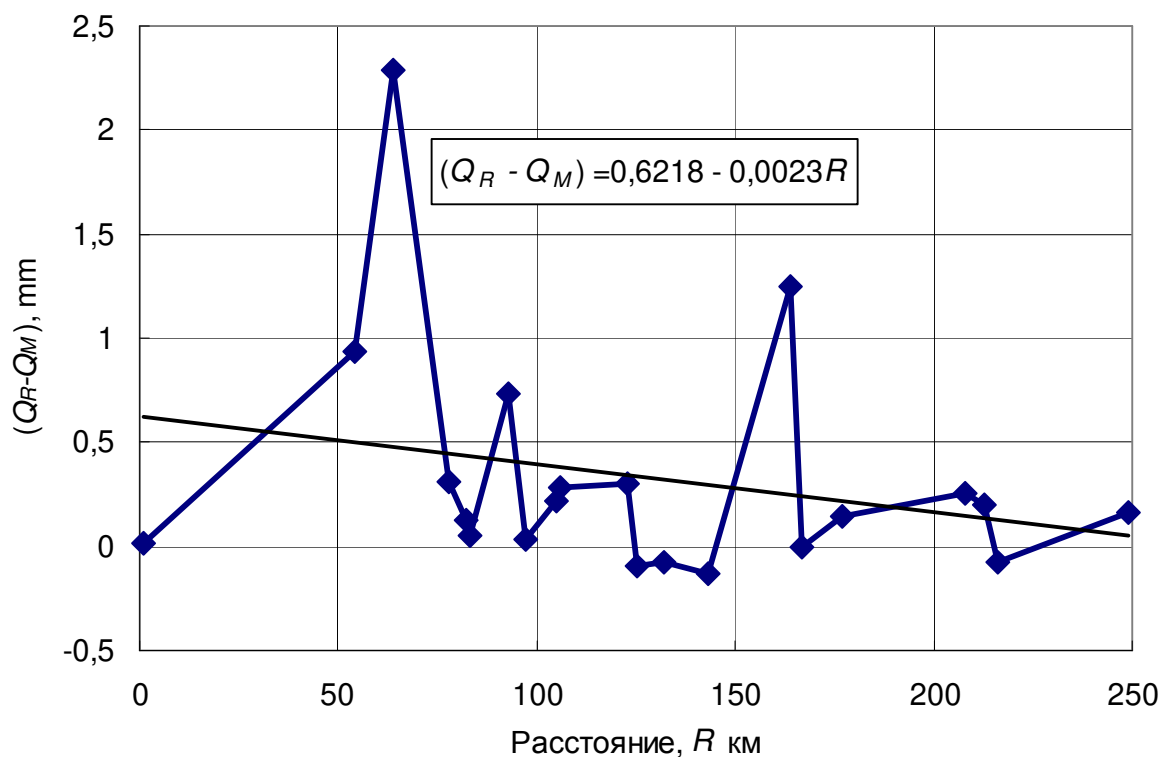


Рис. 3.17 – Зависимость от расстояния расхождения полусуточных сумм осадков по данным сети метеостанций и Ставропольского «ДМРЛ-С»

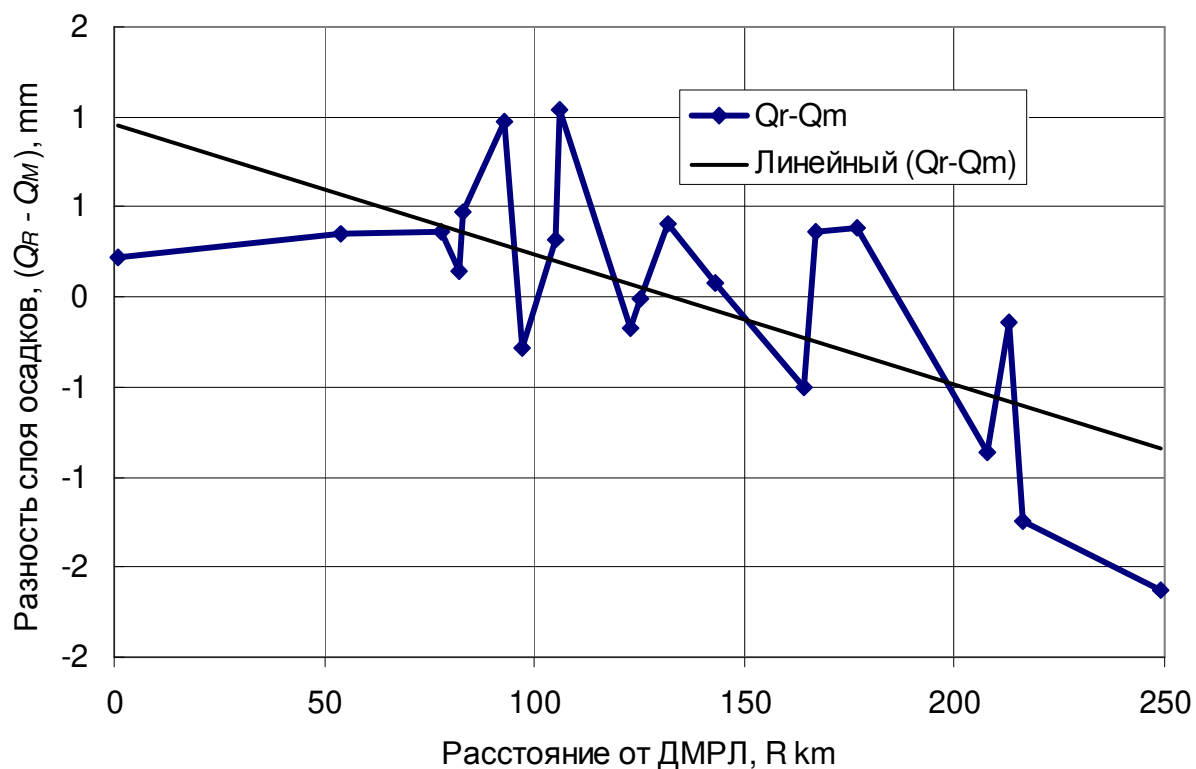


Рис. 3.18 – Зависимость от расстояния расхождения суточных сумм осадков по данным сети метеостанций и Ставропольского «ДМРЛ-С»

Причинами снижения точности радиолокационного измерения осадков с расстоянием являются следующие факторы:

**1) Удаление радиолуча от поверхности земли** приводит к тому, что даже при стандартной рефракции луч с увеличением расстояния все выше поднимается над поверхностью земли и на расстоянии более 150 км практически не охватывает зону осадков. Такой «перелет» радиолуча приводит к занижениям площади, интенсивности и количества осадков, размера и кинетической энергии града, нарастающим с расстоянием, а на расстоянии около 200 км осадки вообще могут не обнаруживаться. В случае слоисто-дождевых облаков луч может охватывать «яркую линию» таяния снега даже при нулевых углах сканирования, что приводит к завышению отражаемости от 5 до 16 dB и количества осадков до 5 раз [125].

**2) Коэффициент заполнения радиолуча ( $K_L$ )** в связи с его уширением с расстоянием является функцией его ширины, расстояния и тангенциальных размеров цели, т.е.  $K_L = f(R, \theta, l)$ . Обычно полагают  $K_L = 1$ , но это справедливо только в случае обширных полей однородных осадков из слоисто-дождевых облаков и высоком уровне линии таяния снега. В случае кучево-дождевых облаков  $K_L$  уменьшается с расстоянием, так как области высокой отражаемости могут не заполнять зондирующий объем. На удалении  $R = 200$  км при  $\theta = 1,0$  градус диаметр луча достигает 3,5 км, а при  $\theta = 1,5$  градуса – 5,2 км. Локальные максимумы отражаемости в случае грозоградовых облаков часто имеют поперечник меньше 3 – 5 км, радиолуч охватывает области более низкой отражаемости, и значение  $Z_{max}$  может быть занижено на несколько dBZ (например, при  $K_L = 0,5$  на  $10\lg K_L = 3$  dB, а при  $K_L = 0,3$  на  $10\lg K_L = 5,2$  dB). Эти занижения отражаемости и интенсивности осадков нарастают с расстоянием. Кроме того, искажаются градиенты отражаемости, занижаются высоты повышенного радиозоха и т.д. Таким образом, допущение  $K_L = 1,0$  может быть одним из серьезных источников расхождений данных соседних ДМРЛ и ошибок радиолокационных измерений осадков. Корректный учет этого

фактора в зависимости от масштаба неоднородностей облаков, имеющих региональные различия, требует дальнейшей проработки.

Следует отметить, что погрешности измерения осадков, связанные с «перелетом» и уширением луча, закрытием обзора, охватом «яркой линии» таяния снега могут значительно превосходить погрешности, связанные с вариацией параметров  $A$  и  $b$  соотношения  $Z = A I^b$ . Для минимизации занижения количества осадков за счет «перелета» луча, а также исключения «дыр» над горами и за ними предлагается измерение осадков осуществлять в 1 км слое над уровнем основания радиоэха, а не в горизонтальном сечении приземного слоя.

**3) Аномальная рефракция радиоволн** (особенно суперрефракция), связанная с выхолаживанием приземного слоя атмосферы за счет радиационных потерь почвы в безоблачные ночи, а также за счет испарения осадков, приводит к обнаружению радиоэха местных предметов ниже радиогоризонта. Без фильтрации аномального радиоэха они могут интерпретироваться как очаги осадков, гроз и даже града. Эти ложные очаги являются серьезной помехой при автоматизированных наблюдениях и могут создавать большой слой ложных осадков. Аномальная рефракция приводит также к искажению высот радиоэха [122].

### **3.5.3. Неполная фильтрация радиоэха местных предметов**

Явный всплеск радиолокационного слоя осадков в районе метеостанции Светлоград (см. рисунок 3.19), по-видимому, связан с неполной фильтрацией радиоэха неподвижных целей (местных предметов) и поэтому на этой позиции и в ясную погоду появляются ложные осадки.

Такие же ложные осадки обнаруживает Ставропольский «ДМРЛ-С» и над метеостанцией Дивное (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4 – Дата, время и результаты радиолокационных и наземных измерений слоя осадков, мм

Дата и время измерений		$Q_R$	$Q_M$		$Q_{R-}$	
на ГМС	на ДМРЛ	мм	мм	R, км	$Q_M$ , мм	Наименование ГМС
01.08.13-07:00	1.8.13-6:00	0,1	0	1	0,1	Stavropol
		0	0	54	0	Nevinnomysk
		<b>4</b>	<b>0</b>	<b>64</b>	<b>4</b>	<b>Svetlograd</b>
		0	0	78	0	Armavir
		0,1	0	82	0,1	Novoaleksandrovske
		0	0	83	0	Aleksandrov
		0,3	0	93	0,3	Krasnogvard
		0	0	97	0	Cherkesk
		0	0	105	0	Blagodarnyj
		0,1	0	106	0,1	Gorodovikovsk
		0	0	123	0	Mineralnye
		0	0	125	0	Kropotkin
		<b>0</b>	<b>6</b>	<b>132</b>	<b>-6</b>	<b>Divnoe</b>
		0,1	0	143	0,1	Belaia-glina
		0	0	164	0	Budennovsk
		0	0	167	0	Arzgir
		0	0	177	0	Tihoreck
		0	0	208	0	Elista
		0	0	213	0	Nalcik
		0	0	216	0	*Prohladnyi
		0	0	249	0	Kuscevskaia

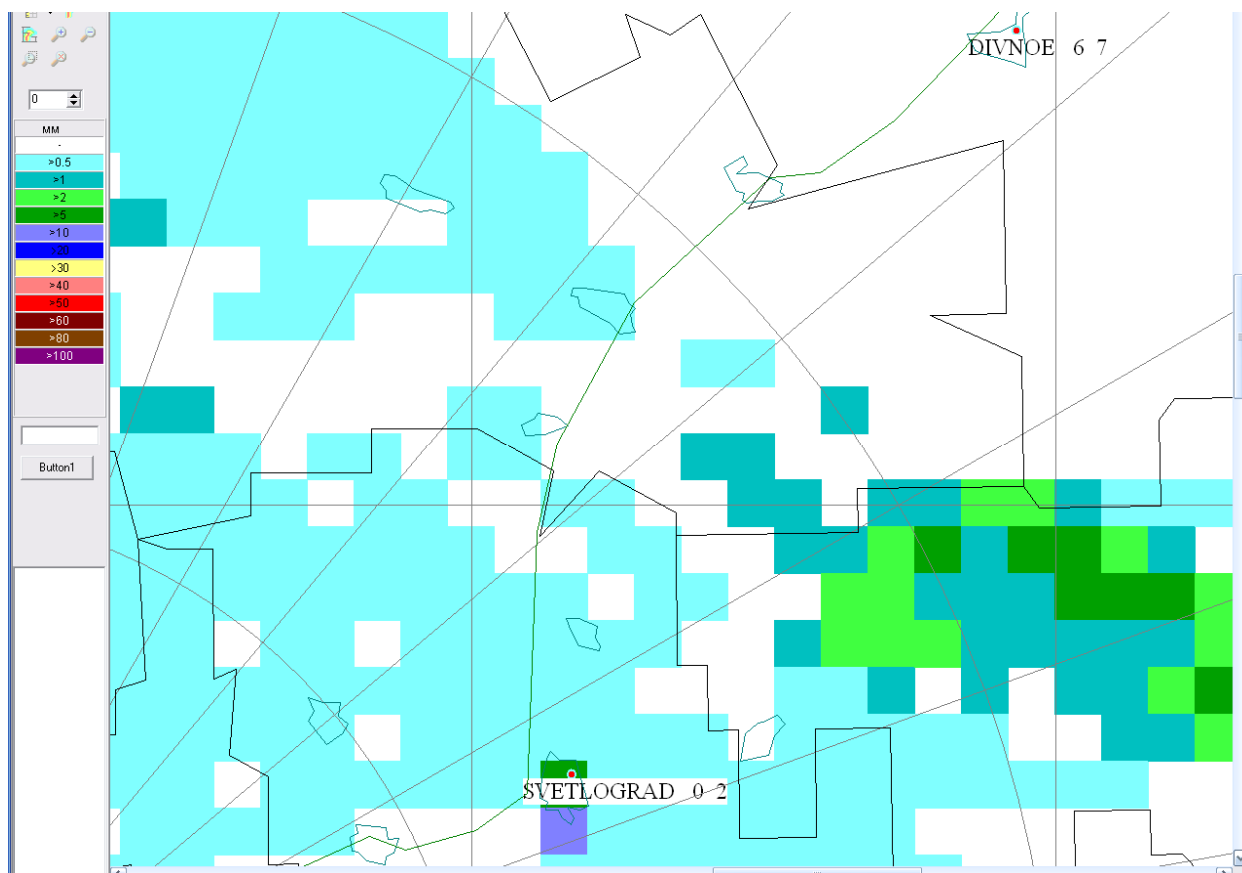


Рис. 3.19 – Всплеск радиозха на позиции метеостанции Светлоград, обуславливающий ложные осадки

### 3.5.4 Расхождения, связанные со сбоем даты и времени поступления метеоданных на сайт Росгидромета

Сравнение данных радиолокационных и наземных данных о слое осадков за 12 часов, измеренных 2013.08.13, дает сильное расхождение результатов (см. таблицу 3.5, рис. 3.21) особенно по пункту Городовиковск, где ДМРЛ показывает 18,4 мм осадков, а метеостанция – 0 мм (см. рисунок 3.20а). Более подходящими данными метеостанций для данного периода радиолокационных наблюдений являются данные за следующий период 13.08.02:19 (Таблица 3.6, см. рис. 3.20б). Если наложить данные метеостанций из рисунка 3.20б на рисунок 3.20а, то получается вполне приемлемая картина.

Таблица 3.5 – Дата, время и результаты радиолокационных и наземных измерений слоя осадков (мм) 13.08.2013 в 18:00.

Дата и время измерений		$Q_R$	$Q_M$		$Q_R$	Наименование
на ГМС	на ДМРЛ	мм	мм	$R$ , км	$Q_M$ , мм	ГМС
01.08.13-	1.8.13-					
19:00	18:00	0,1	0	1	0,1	Stavropol
		0,3	0	78	0,3	Armavir
		0,1	0	82	0,1	Novoaleksand-e
		0	0	83	0	Aleksandrov
		0,699	0	93	0,699	Krasnogvard
		0	0	97	0	Cherkesk
		0,1	0	105	0,1	Blagodarnyj
		<b>18,39</b>	<b>0</b>	<b>106</b>	<b>18,39</b>	<b>Gorodovikovsk</b>
		0	0	123	0	Mineralnye
		0,2	0	125	0,2	Kropotkin
		1	0	132	1	Divnoe
		0	0	164	0	Budennovsk
		0	0	167	0	Arzgir
		0	0	177	0	Tihoreck
		0	0	208	0	Elista
		0	0	213	0	Nalchik
		0	0	216	0	*Prohladnyi
		0	0	249	0	Kuscevskaia

Таблица 3.6 – Дата, время и результаты радиолокационных и наземных измерений слоя осадков (мм) 13.08.2013 в 06:00

Дата и время измерений		$Q_R$	$Q_M$		$Q_R - Q_M$	Наименование
на ГМС	на ДМРЛ	мм	мм	$R$ , км	мм	ГМС
02.08.13-07:00	2.8.13-6:00	0,1	0	1	0,1	Stavropol
		0,1	0	54	0,1	Nevinnomysk
		3	0	64	3	Svetlograd
		0	0	78	0	Armavir
		0,2	0	82	0,2	Novoaleksand-e
		0,1	0	83	0,1	Aleksandrov
		0,5	0	93	0,5	Krasnogvard
		0	0	97	0	Cherkesk
		0	0	105	0	Blagodarnyj
		<b>0,2</b>	<b>16</b>	<b>106</b>	<b>-15,8</b>	<b>Gorodovikovsk</b>
		0	0	123	0	Mineralnye
		0	0	125	0	Kropotkin
		0	1	132	-1	Divnoe
		2	4	143	-2	Belaia-glina
		0	0	164	0	Budennovsk
		0	0	167	0	Arzgir
		0	0	177	0	Tihoreck
		1	0	208	1	Elista
		0	0	213	0	Nalchik
		0	0	216	0	*Prohladni
		0	0	249	0	Kuscevskaia

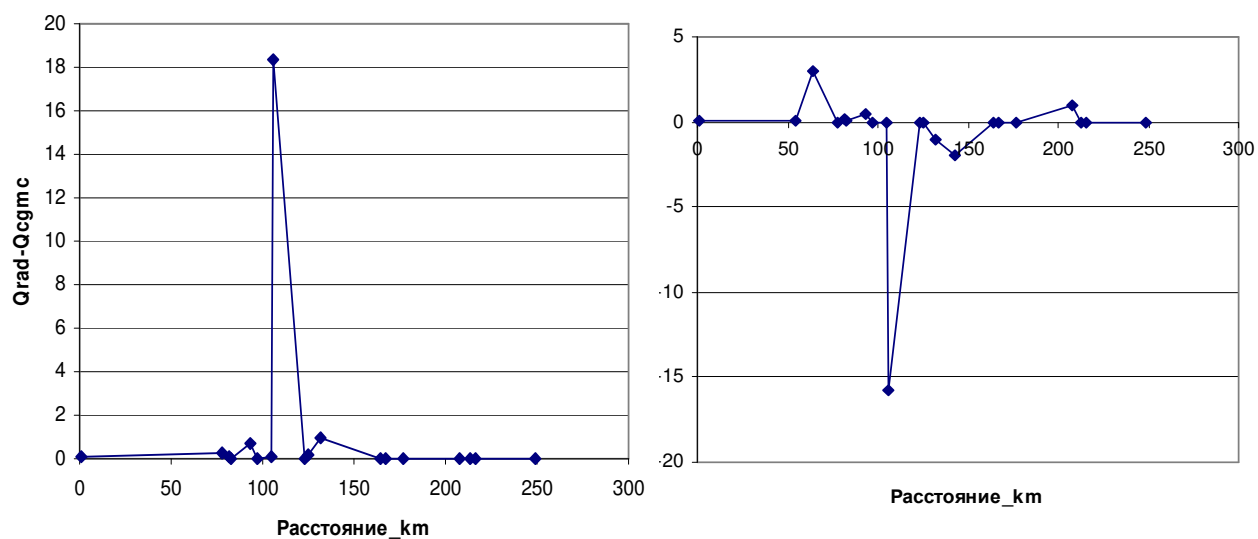


Рис. 3.20 Пример ложного расхождения слоя осадков ( $Q_R - Q_M$ ) в связи с ошибкой времени данных

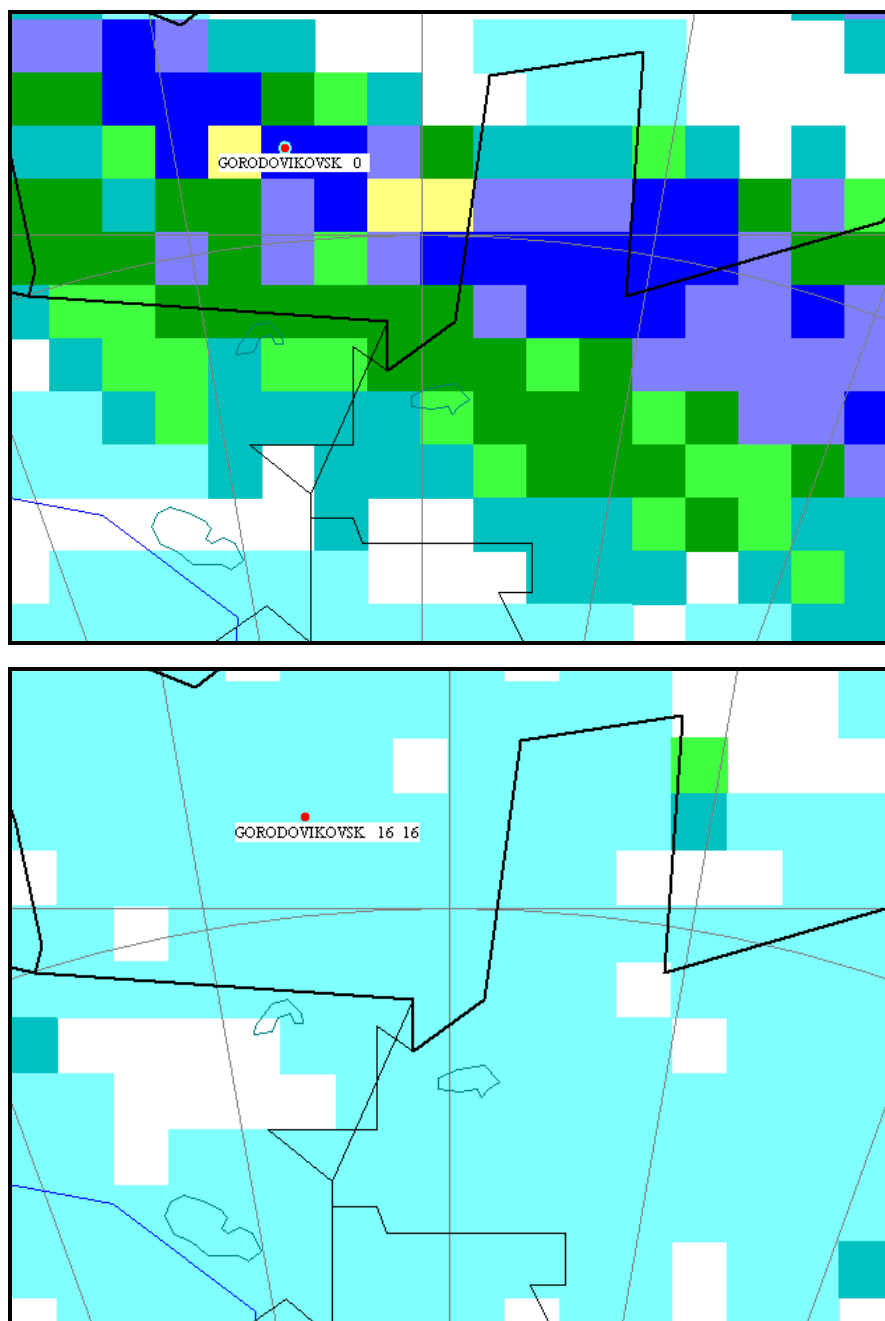


Рисунок 3.21 Демонстрация нереального расхождения слоя осадков ( $Q_R - Q_M$ ) на метеостанции Gorodovikovsk

### 3.5.5 Расхождения в пограничной зоне матрицы квадратов

Из рисунка 3.1 следует, что по данным «ДМРЛ-С» слой осадков в квадрате 4x4 км, где расположена метеостанция Белая Глина, составляет более 10 мм, что не очень согласуется с данными метеостанции (24 мм), но в соседних квадратах 4x4 км «ДМРЛ-С» показывает слой осадков более 20 мм, что хорошо согласуется с данными метеостанции. Вследствие неоднородности полей осадков факты таких расхождений (согласия) данных отмечаются

довольно часто и могут объясняться несоответствием координат радарных и наземных измерений, а также ветровым переносом (сдвигом) осадков.

Таблица 3.7 – Пример расхождений слоя осадков (мм) по данным радиолокационных и наземных измерений на границе квадратов 4x4 км.

Дата и время измерений		$Q_R$	$Q_M$		$Q_R - Q_M$	Наименование
на ГМС	на ДМРЛ	мм	мм	R, км	мм	ГМС
03.08.13- 19:00	3.8.13- 18:00	0	0	1	0	Stavropol
		0	0	54	0	Nevinnomysk
		3	0	64	3	Svetlograd
		0	0	78	0	Armavir
		5	4	82	1	Novoaleksand-e
		0,899	0	83	0,899	Aleksandrov
		<b>12</b>	<b>1</b>	<b>93</b>	<b>11</b>	<b>Krasnogvard</b>
		0	2	97	-2	Cherkesk
		0	0	105	0	Blagodarnyj
		8	8	106	0	Gorodovikovsk
		5	9	123	-4	Mineralnye
		2	1	125	1	Kropotkin
		1	0	132	1	Divnoe
		<b>18</b>	<b>24</b>	<b>143</b>	<b>-6</b>	<b>Belaia-glina</b>
		<b>7</b>	<b>0</b>	<b>164</b>	<b>7</b>	<b>Budennovsk</b>
		0	0	167	0	Arzgir
		1	2	177	-1	Tihoreck
		0,1	0	208	0,1	Elista
		2	0	213	2	Nalchik
		1	0	216	1	*Prohladnyi
		7	11	249	-4	Kuscevskaia

В таблице 3.7 и на рисунке 3.15 приводится пример таких больших расхождений, когда на метеостанции слабые осадки, а «ДМРЛ-С» показывает, что в соседних квадратах выпадают сильные осадки.

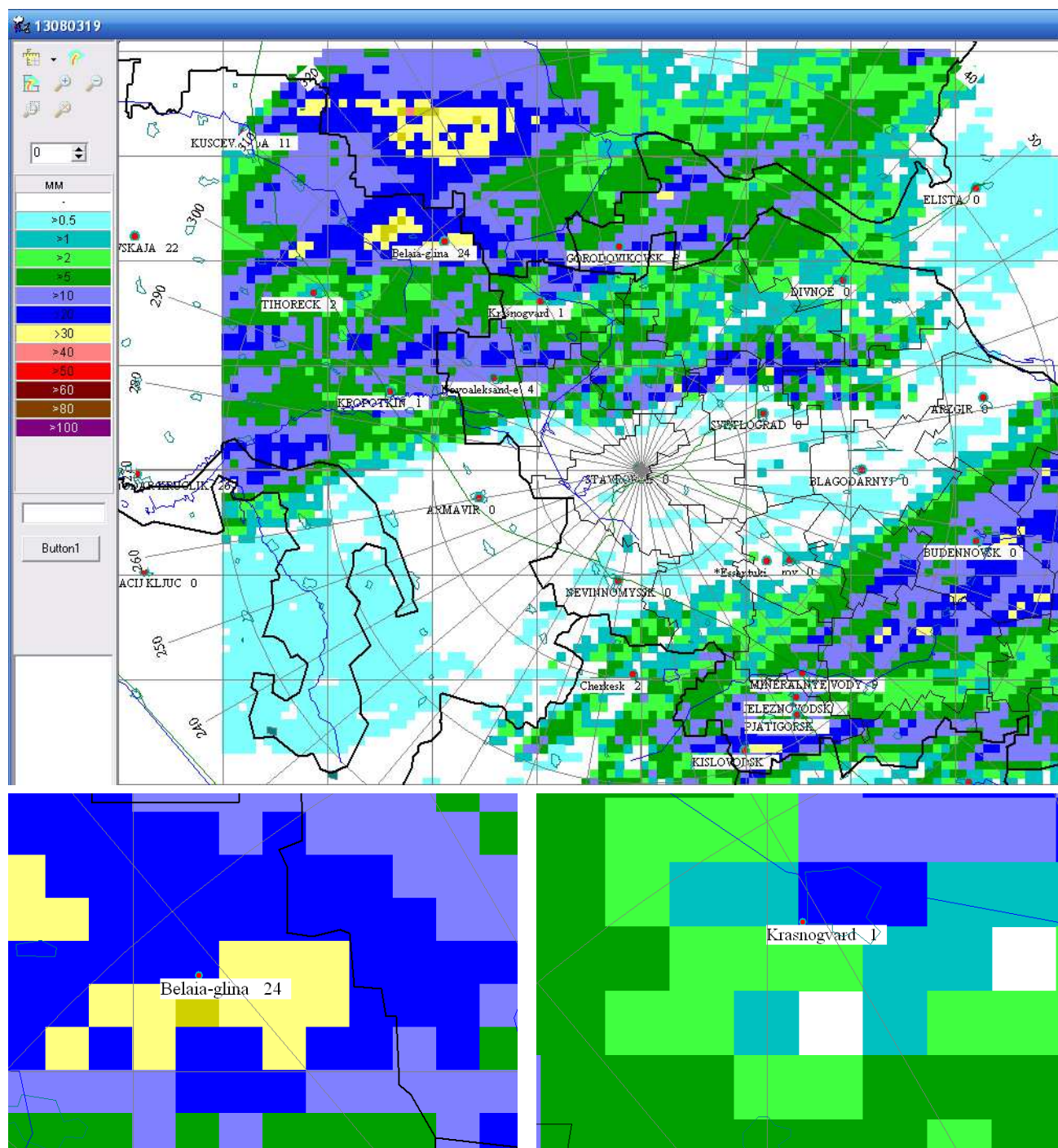


Рисунок 3.15 Демонстрация расхождения слоя осадков ( $Q_R - Q_M$ ), связанного с неоднородностью осадков, когда осадки на позиции метеостанции резко отличаются от слоя осадков в соседних квадратах

Другие примеры расхождений радиолокационных и наземных данных о количестве осадков на границах квадратов 4x4 км представлены на рисунке 3.16. Такие расхождения количества осадков практически всегда отмечаются в случае осадков из кучево-дождевой облачности, имеющих большую пространственно-временную неоднородность.

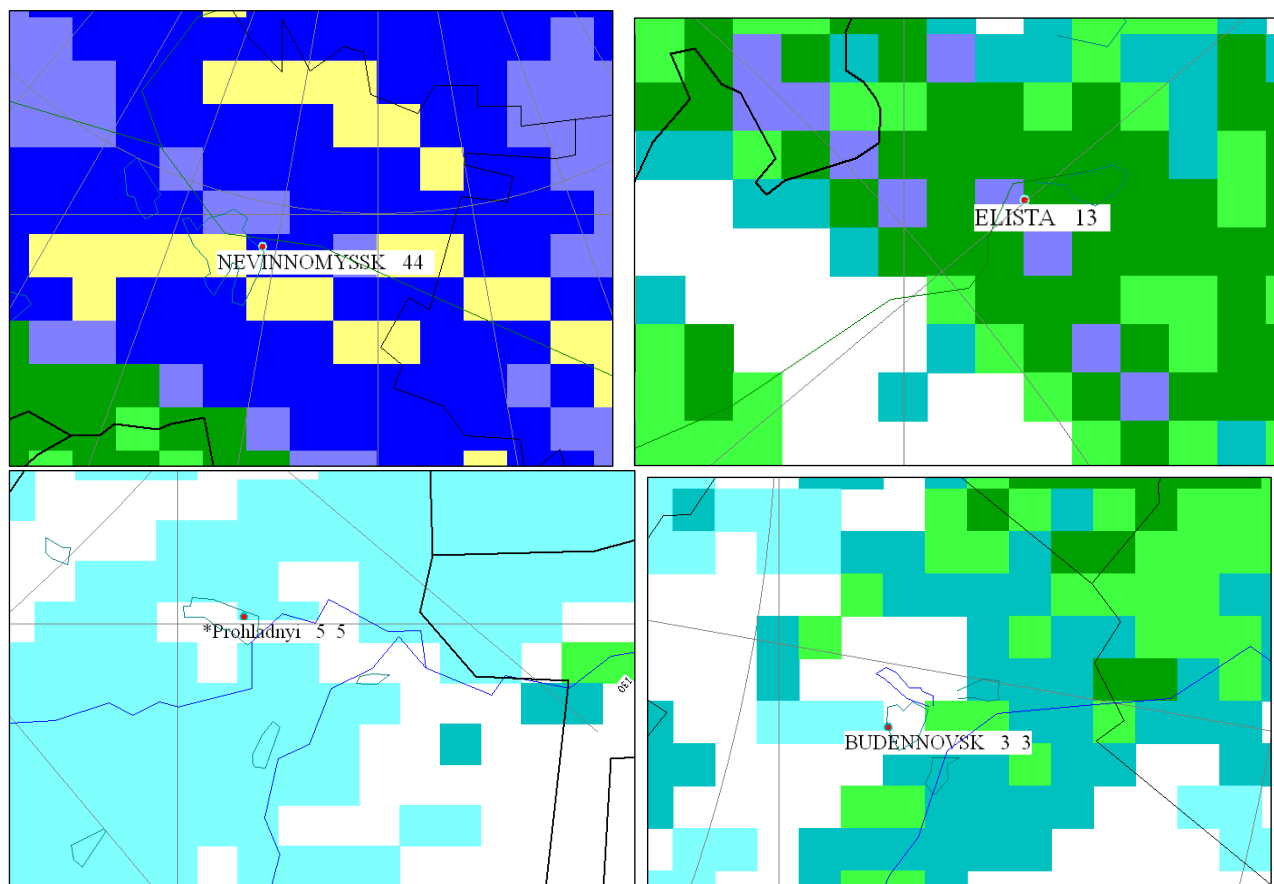


Рисунок 3.16 Демонстрация расхождения слоя осадков ( $Q_R - Q_M$ ), связанного с неоднородностью осадков, когда осадки на позиции метеостанции резко отличаются от слоя осадков в соседних квадратах

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют заключить следующее:

1. Разработан метод автоматической идентификации облаков и КЯ. Это позволяет в автоматическом режиме контролировать временной ход

параметров, определять скорость и направление движения, оценивать грозо- и градоопасность облаков.

2. Метод автоматической идентификации площадок засева с высокой степенью точности коррелирует с реальными данными воздействия на градовые процессы.

3. Метод автоматического сравнения радиолокационной и наземной информации позволил обнаружить причины расхождения показаний МРЛ и метеостанций.

4. Автоматизированная радиолокационная система требует доработок алгоритма фильтрации сигналов от местных предметов.

5. За счет локальности измерения осадков наземными метеостанциями и на порядки более низким пространственным разрешением измерений МРЛ, данные метеостанций плохо коррелируют с локационными данными.

6. Предлагаемый метод и алгоритмы автоматизированной калибровки локаторов в сети реализован и проверен в разработанной нами программе. Было проанализировано множество случаев несовпадения показаний локаторов, и рассчитаны необходимые изменения в коэффициентах константы локатора. При этом разница в показаниях локаторов была определена после того, как в ручном режиме службой проводился анализ и сопоставление данных локаторов в городах Ставрополь и Зеленокумск. Несмотря на то, что существующая сеть штормооповещения достаточно надежна и не имеет серьезных проблем с потерей сигнала, со временем неминуем износ оборудования и увеличение потерь сигнала. Данный метод полезен для существующей сети МРЛ, но особо полезен для формирующейся сети ДМРЛ, ввиду большого числа радиолокационных станций и невозможности в реальном времени в ручном режиме отслеживать разность показаний локаторов сети в равноудаленных областях пространства.

7. На основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек разработан метод фильтрации аномального радиоэха. В основе метода лежит метод сопоставления радиолокационной отражаемости для одних и тех же

точек пространства с разных локаторов и определения областей, где возможно образование аномальной рефракции. Далее на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек и сопоставления характеристик заданных конвективных ячеек, наблюдаемых с разных локаторов, идентифицируются области с аномальной рефракцией. Основным критерием механизма фильтрации в зоне перекрытия двух и более локаторов является предположение, что соседние локаторы не дают в одном и том же месте картину аномального радиоэха. Если же области радиолокационного зондирования, в которых появились высокие значения отражаемостей, ранее были занесены в базу данных как место возможного появления аномального радиоэха, и высокие отражаемости появились в утренние или ночные часы, то можно в автоматическом режиме обнулять радиолокационную информацию в заданных углах файла обзора.

8. В случае же отсутствия зон перекрытия двух и более локаторов, необходимо вручную локализовать области возможного появления аномального радиоэха в утренние и ночные часы, в наиболее вероятные моменты появления аномальной рефракции и фильтровать нижние углы в этих локализованных областях.

9. Предлагаемый метод и алгоритмы статистического анализа молниевой активности реализованы и проверены в разработанной программе. На базе этого метода были проведены исследования грозоградовой активности на территории Северного Кавказа.

## Глава 4

# ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗО-ГРАДОВОЙ АКТИВНОСТИ ОБЛАКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ

### 4.1 Исследование повторяемости и параметров градовых КЯ

4.1.1. Реализация предложенных алгоритмов автоматической идентификации КЯ, измерения комплекса их параметров и получения таблиц и графиков временного хода в автоматизированной системе «АСУ-МРЛ» позволило получить мощный инструмент оперативного и всестороннего исследования облачных систем и их КЯ, включая:

- оценку состояния каждой КЯ в радиусе радиолокационного обзора и определение явлений погоды, наблюдающихся в каждой КЯ;
- оценку степени градовой, грозовой и ливневой опасности каждой КЯ в соответствии с критериями [16];
- исследование соотношения КЯ с разной степенью градовой или иной опасности;
- получение и исследование годовой (помесячной) и суточной (почасовой) повторяемости опасных КЯ в любом заданном году и в целом за все годы наблюдений;
- исследование региональной повторяемости опасных КЯ с заданием границ каждого региона исследований;
- исследование взаимосвязи периодов развития опасных явлений погоды с температурой, влагосодержанием атмосферы, аэросиноптическими условиями, солнечной активностью и т.д.

Возможности такого инструмента исследований расширены за счет ввода полученных таблиц комплекса параметров в программы статистической обработки больших массивов информации [102].

4.1.2. На основе применения созданного инструмента проведены исследования характеристик мощных конвективных облаков на территории

Ставропольского края в период с 2002 по 2008 гг. [116,117,121].

Обработка материала в автоматическом режиме позволила провести статистический анализ обширного массива данных, включающего в себя 701458 КЯ, получить повторяемости значений параметров по 125186 циклам обзора в более чем 324 миллиардах точек пространства размером 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. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований.

Автоматическая обработка данных позволила получить процентное соотношение градовых ячеек разной мощности, а также соотношение КЯ с градовыми и ливневыми осадками разной интенсивности.

Анализ показал, что в период с 2002 по 2008 гг. в радиусе 208 км вокруг Ставропольского АМРК «АСУ-МРЛ» на площади  $\approx 136$  тысяч км<sup>2</sup> отмечалось всего 701 458 КЯ, из которых 72,1 % составляют КЯ со слабыми ливневыми дождями (с интенсивностью  $J < 5$  мм/час), 23,5 % КЯ с ливневыми осадками (с  $5 < J < 10$  мм/час), 2,5 % КЯ 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 (см. рис. 4.1а).

Из рис. 4.1 б следует, что из 13 479 градовых КЯ, наблюдавшихся в течение 7 лет, 64,9 % являются слабыми, из которых выпадает ливневой дождь с крупной, мелким градом, который практически не наносит ущерба сельскохозяйственным культурам, 32,7 % КЯ можно отнести к умеренным, из которых выпадает град умеренной интенсивности, наносящий частичные повреждения растениям (степень повреждения составляет порядка 5 – 30 %), а 2,4 % градовых КЯ сопровождаются интенсивными градобитиями со степенью повреждения сельхозкультур от 30 до 100 %.

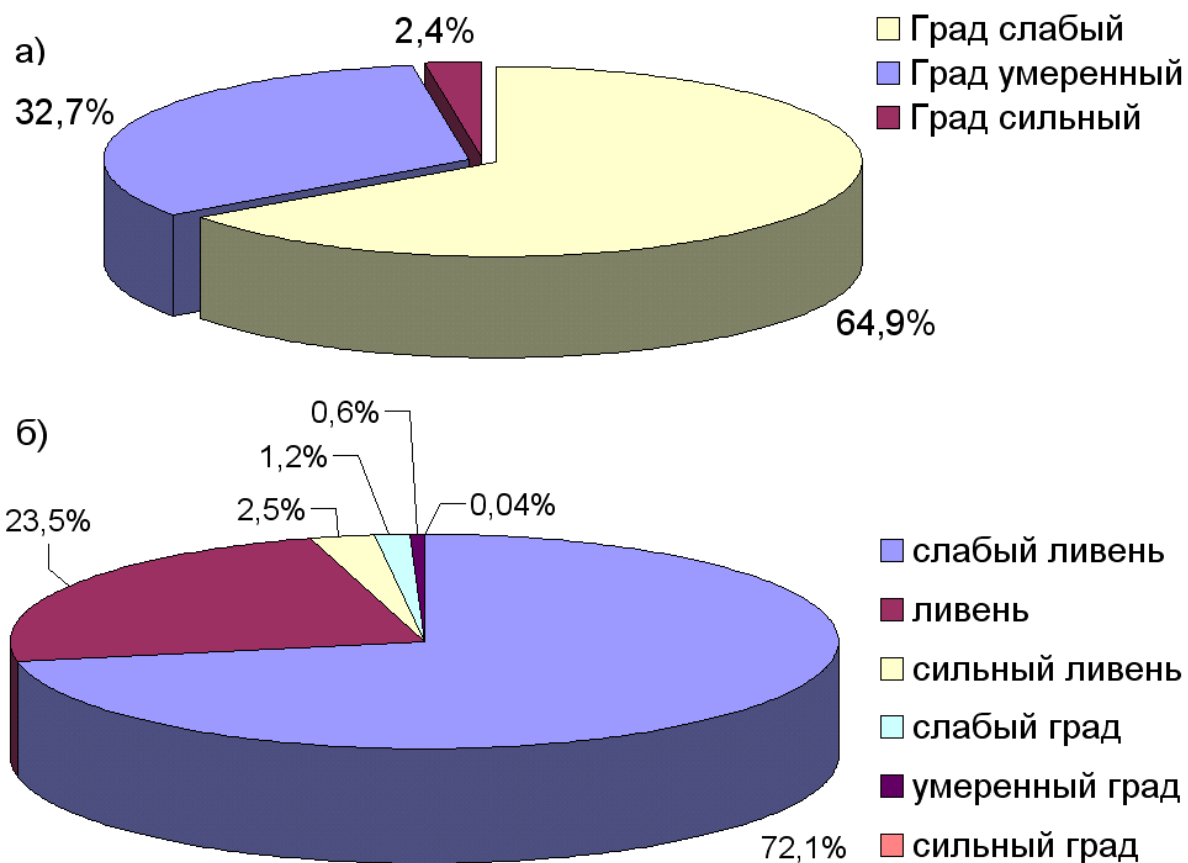


Рис. 4.1 Повторяемость а) градовых и б) всех типов КЯ разной интенсивности ( $P$ , %), осредненная за период 2002 – 2008 гг., на площади радиусом 200 км вокруг Ставропольского АМРК «АСУ-МРЛ»

Эти данные вполне согласуются с количеством ОВ, засеянных Ставропольской ВС в пересчете на площадь ЗТ, которая нарастала с годами и в 2009 г. составила 790 тысяч км<sup>2</sup>.

4.1.4. Сравнение градовой активности Ставропольского края с 2002 по 2018 гг. показало, что в последние годы градоопасность территории края существенно повысилась (см. рис. 4.2), что может быть обусловлено влиянием глобального потепления климата и показанным увеличением в равнинных районах Северного Кавказа количества осадков, температуры и влажности атмосферы.

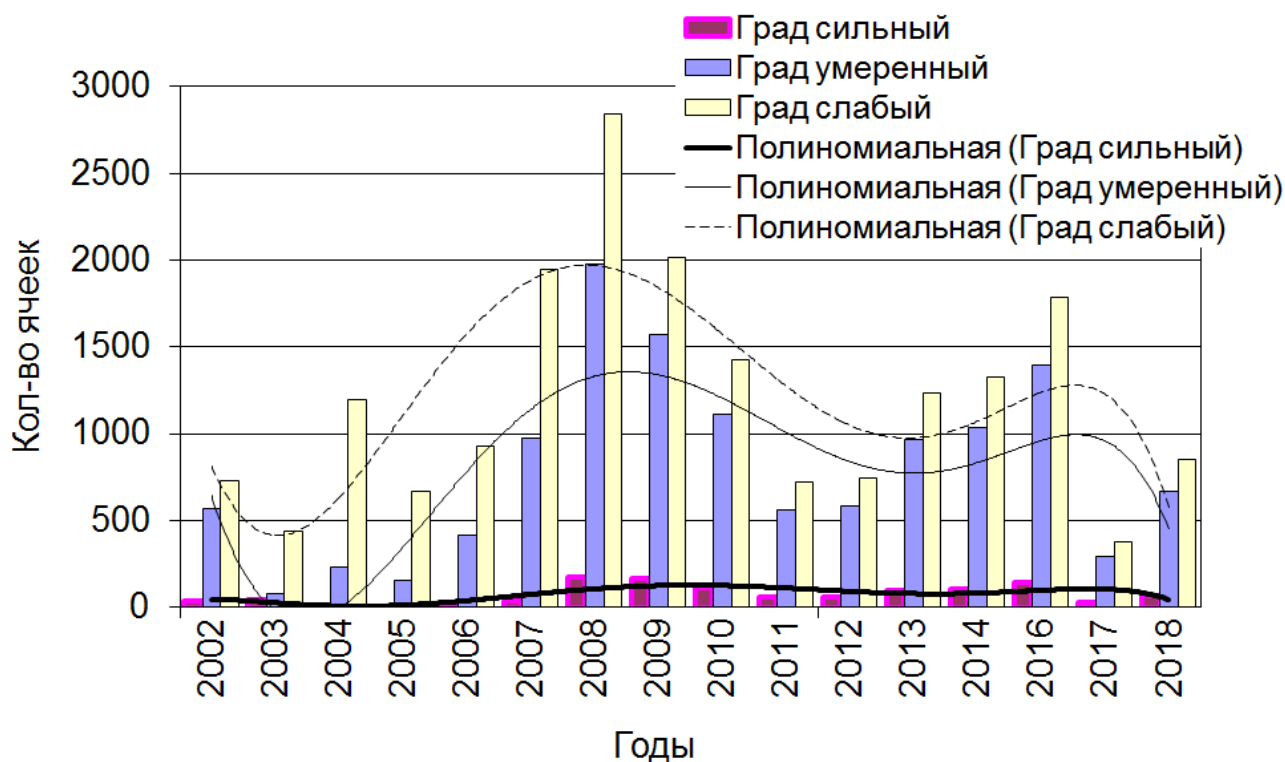


Рис. 4.2 Количество градовых ячеек по годам в период с 2002 по 2018 гг.

Как видно из рис. 4.16, общее количество градовых ячеек увеличивается с годами, в 2008 г. оно увеличилось в 3-4 раза в сравнении с 2002 – 2005 гг. Наблюдается тенденция увеличения и количества мощных градовых ячеек.

Примечательно, что график градовой активности на территории Северного Кавказа имеет волнообразный вид, при этом подъемы чередуются со спадами. Пики градовой активности за последние 15 лет приходятся на 2008 и 2016 годы. Можно предположить, что градовая активность достигает своего максимума раз в 8 лет.

Аппроксимация многолетнего годового хода числа градовых ячеек  $N$ , представленного на рис. 4.16 полиномом 6-й степени, дает следующие результаты:

– число КЯ со слабым градом:

$$N_C = -0,0063x^6 + 0,0817x^5 + 4,2027x^4 - 106,46x^3 + 839,29x^2 - 2240x + 2318,8 \quad (4.1)$$

– число КЯ с умеренным градом:

$$N_Y = -0,0068x^6 + 0,1465x^5 + 2,2471x^4 - 85,316x^3 + 779,94x^2 - 2437,5x + 2381,4 \quad (4.2)$$

– число КЯ с интенсивным (сильным) градом:

$$N_H = -0,0031x^6 + 0,1474x^5 - 2,607x^4 + 20,684x^3 - 69,428x^2 + 76,832x + 21 \quad (4.3)$$

где  $x$  – порядковый номер года, начиная с 2002 г.

4.1.4. Анализ *месячного хода* градовой активности (см. рис. 4.3) показал, что наиболее высокая градовая активность в Ставропольском крае отмечается в июне и августе, на которые приходится и основное количество осадков.

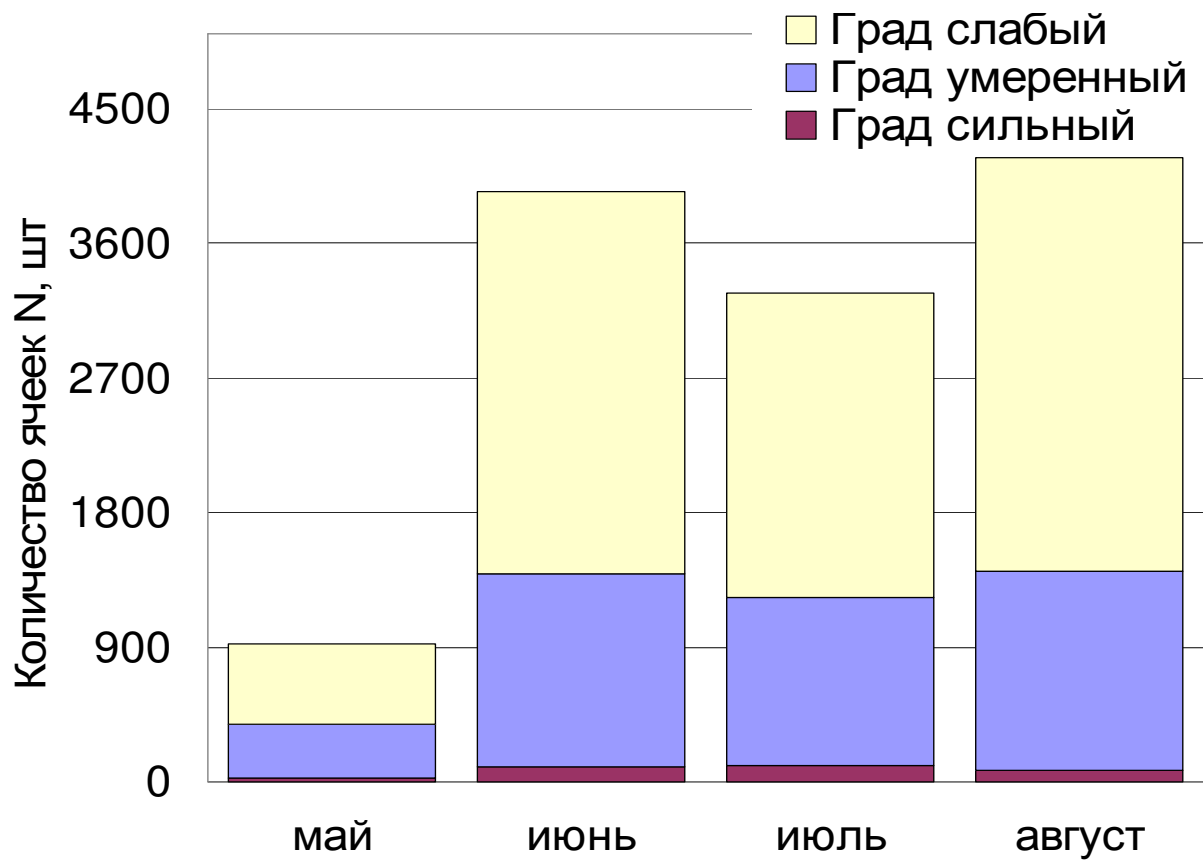


Рис. 4.3 Повторяемость градовых процессов по месяцам сезона, осредненная за 2002 – 2008 гг.

Данные радиолокационных наблюдений о распределении градовой активности по месяцам можно объяснить с помощью данных наземной сети метеонаблюдений.

Согласно этим данным [39,52], упругость водяного пара по территории Ставропольского края распределена неравномерно. Наибольших значений она достигает на крайнем северо-западе (Красногвардейский и Новоалександровской районы) и крайнем юго-востоке (Курский и

Нефтекумский району) края. Наименьшие значения отмечаются в юго-западной части Предгорного района и в районе г. Ставрополь.

Наряду с годовым ходом значение упругости водяного пара имеет явно выраженный суточный ход. Минимум отмечается перед восходом солнца, максимум – в дневное время. При четырехсрочных наблюдениях минимум фиксируется обычно в срок 07<sup>00</sup>, а максимум, обусловленный прогревом подстилающей поверхности, повышением скорости испарения, скорости ветра и интенсивности турбулентного перемешивания, в 13<sup>00</sup>. Вечером температура подстилающей поверхности постепенно понижается, а относительная влажность повышается.

Как видно из рисунка 4.4.а, по данным метеостанций в Ставропольском крае наиболее жарким месяцем является июль с максимальным парциальным давлением водяного пара (рис. 4.18.б), что может оказывать влияние на процессы градообразования.

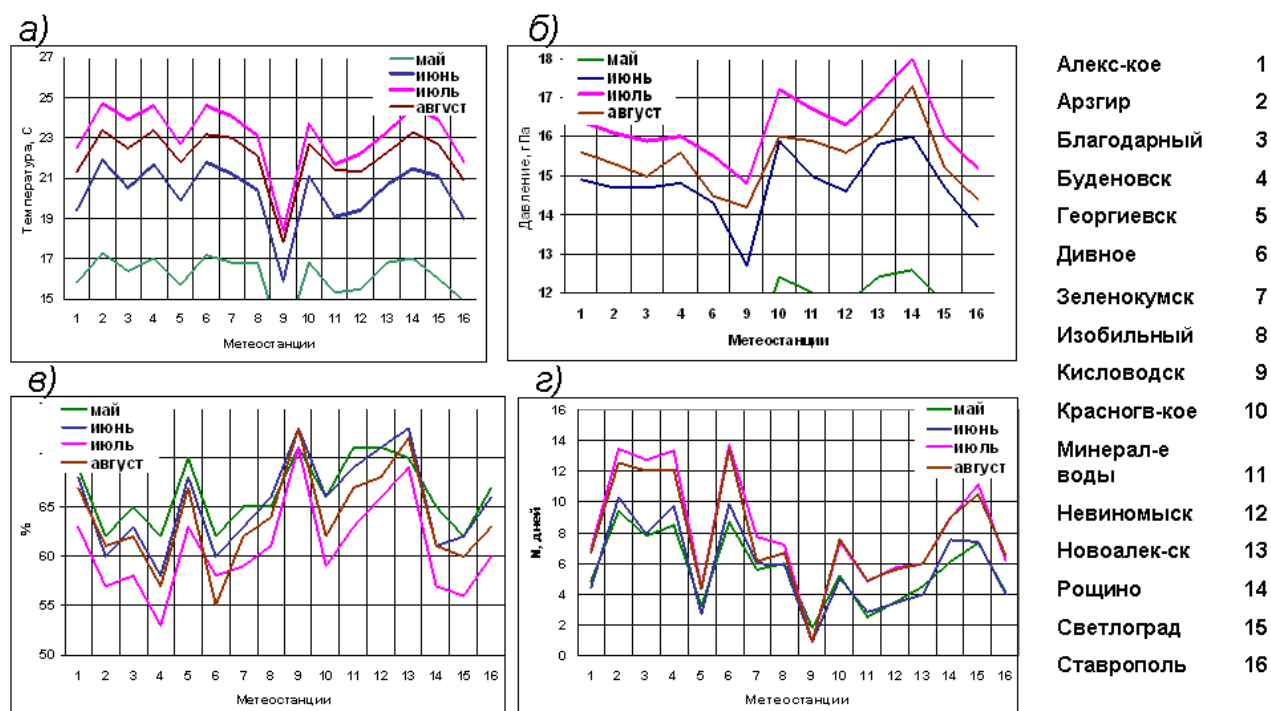


Рис. 4.4 Среднемесячная температура а), парциальное давление водяного пара б), относительная влажность воздуха в) и число дней с относительной влажностью воздуха не более 30% г) по данным метеостанций, список которых приведен в правой части рисунка

Очень важной и показательной характеристикой влажности воздуха является его относительная влажность ( $f=(e/E)*100\%$ ), представляющая собой отношение парциального давления водяного пара ( $e$ ), содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного пара ( $E$ ) при той же температуре.

Из рис. 4.18.в и 4.18.г видно, что относительная влажность воздуха в июле несколько меньше, чем в июне и августе, что может быть и является причиной повышенной градовой активности июня и августа.

Более того число дней с относительной влажностью не более 30% в августе больше, чем в июне, в котором повторяемость и мощность градовых облаков несколько меньше, чем в августе. Это связано скорее всего с тем, что в августе температура выше, чем в июне.

4.1.5. Анализ *суточного хода* количества ячеек (см. рис. 4.5) показал, что град на Северном Кавказе в 2002 – 2008 гг. обычно наблюдался с 13<sup>00</sup> до 21<sup>00</sup>, наиболее градоопасным временем суток был период с 15<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup>, а абсолютный максимум градоопасности региона приходился на 17<sup>00</sup>.

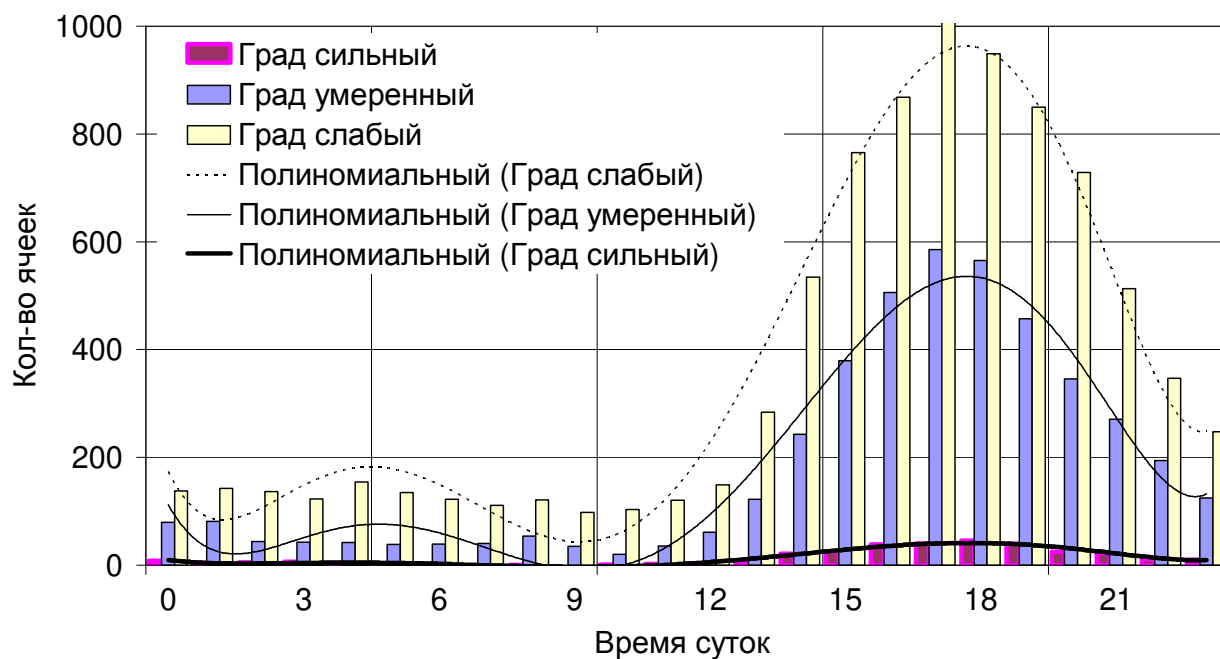


Рис. 4.5 Суточный ход градоопасности Северного Кавказа, осредненный за 2002 – 2008 гг.

Сравнение радиолокационных данных о суточном ходе частоты выпадения града, представленных на рис. 4.19, с данными метеостанций и постов на рис. 4.6, полученными А.М. Малкаровой и И.А. Бурановой [11] для этого же региона, показало хорошее согласие данных радиолокационных и наземных наблюдений.

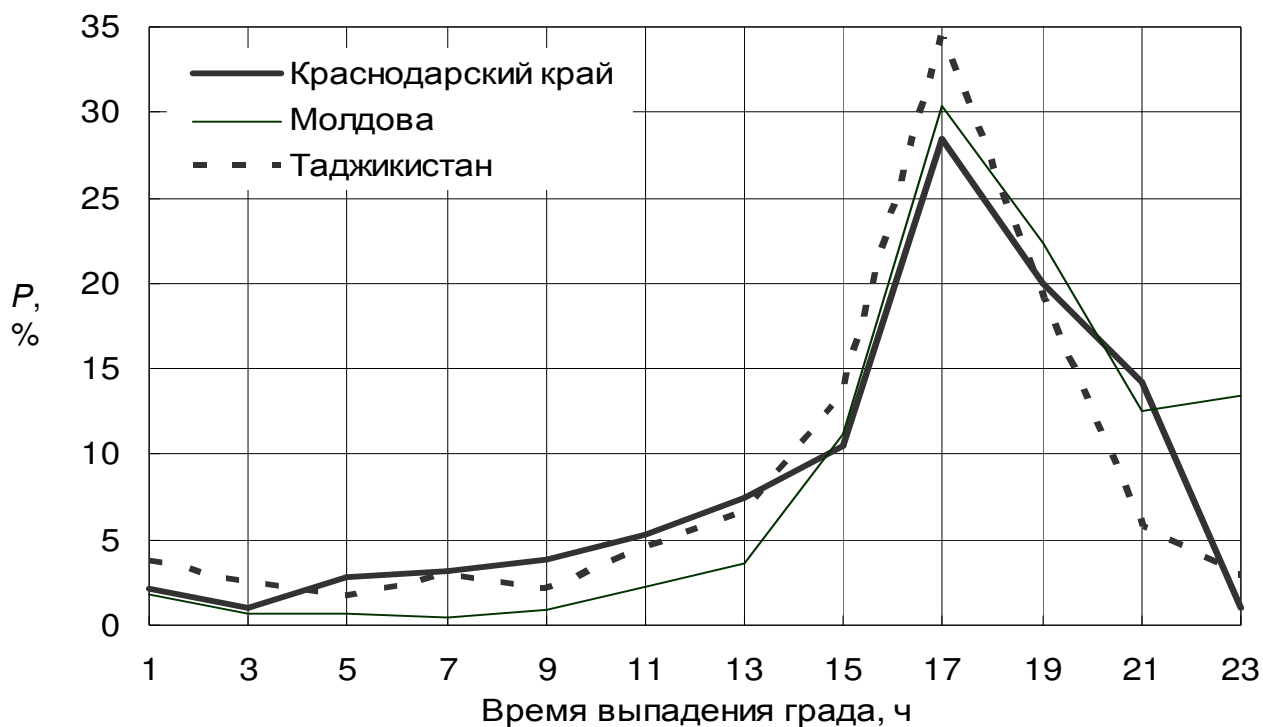


Рисунок 4.6 – Суточный ход частоты выпадения града  $P$ , % в Краснодарском крае РФ, Молдове и Таджикистане за 2002-2008 гг. [19]

В ночные часы град выпадает редко, в утренние часы (с  $6^{00}$  до  $9^{00}$ ) несколько чаще, с  $9^{00}$  до  $12^{00}$  практически выпадения града не отмечается. С  $12^{00}$  отмечается нарастание частоты выпадения града до  $17^{00}$ , а после этого идет постепенный спад градоопасности.

При этом в течение 1 сезона в промежуток времени с  $16^{00}$  до  $17^{00}$  может наблюдаться в радиусе 200 км около 38 градовых ячеек, из которых 1-2 можно отнести к мощным градовым ячейкам.

Аппроксимация суточного хода числа градовых ячеек  $N$ , представленного на рис. 4.5 полиномом 6-й степени, дает следующие результаты:

- число КЯ со слабым градом:

$$N_C = 0,002x^6 - 0,107x^5 + 2,86x^4 - 35,1x^3 + 201x^2 - 484x + 490; \quad (4.4)$$

– число КЯ с умеренным градом:

$$N_U = 0,001x^6 - 0,071x^5 + 1,923x^4 - 24,16x^3 + 144x^2 - 374x + 364; \quad (4.5)$$

– число КЯ с интенсивным (сильным) градом:

$$N_{II} = 7 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,005x^5 + 0,134x^4 - 1,67x^3 + 9,75x^2 - 25,4x + 26,8; \quad (4.6)$$

где  $x$  – порядковый номер часа, начиная с 1.

Анализ суточного хода градоопасности в каждом отдельном году (см. рис. 4.7) показывает различия как в числе наблюдающихся КЯ, соотношении слабых и мощных КЯ, так и в суточном ходе. Например, в 2002 – 2006 гг. градовые КЯ, в том числе и мощные, отмечались чаще с 15<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup>, в 2007 г. с 13<sup>00</sup> до 14<sup>00</sup>, а в 2008 г. градоопасный период, в том числе и мощные градовые КЯ отмечались с 13<sup>00</sup> до 22<sup>00</sup>. Однако во все годы более градоопасной является вторая половина дня.

Мощные градовые процессы почти не отмечались в 2005 г., их было относительно немного в 2006 и 2007 гг., а наибольшее их количество отмечалось в 2003 и 2008 гг., когда соотношение мощных градовых КЯ к общему числу градовых КЯ достигало 4 – 8 %.

Количество градовых КЯ в ночные часы крайне мало в 2002 и 2005 гг. и максимально в 2006 г., когда их число составило около 32 %, от общего числа градовых ячеек, а в 2008 г. около 18 %. Анализ аэросиноптической ситуации показал, что развитие ночных градовых процессов связано с прохождением холодных фронтов, активизирующих развитие конвективной облачности.

Однако мощные градовые процессы в ночное время почти не наблюдаются и обычно отмечаются, как показано на рис. 4. 7– 4.10, в послеполуденное и

вечернее время (с 15<sup>00</sup> до 21<sup>00</sup>).

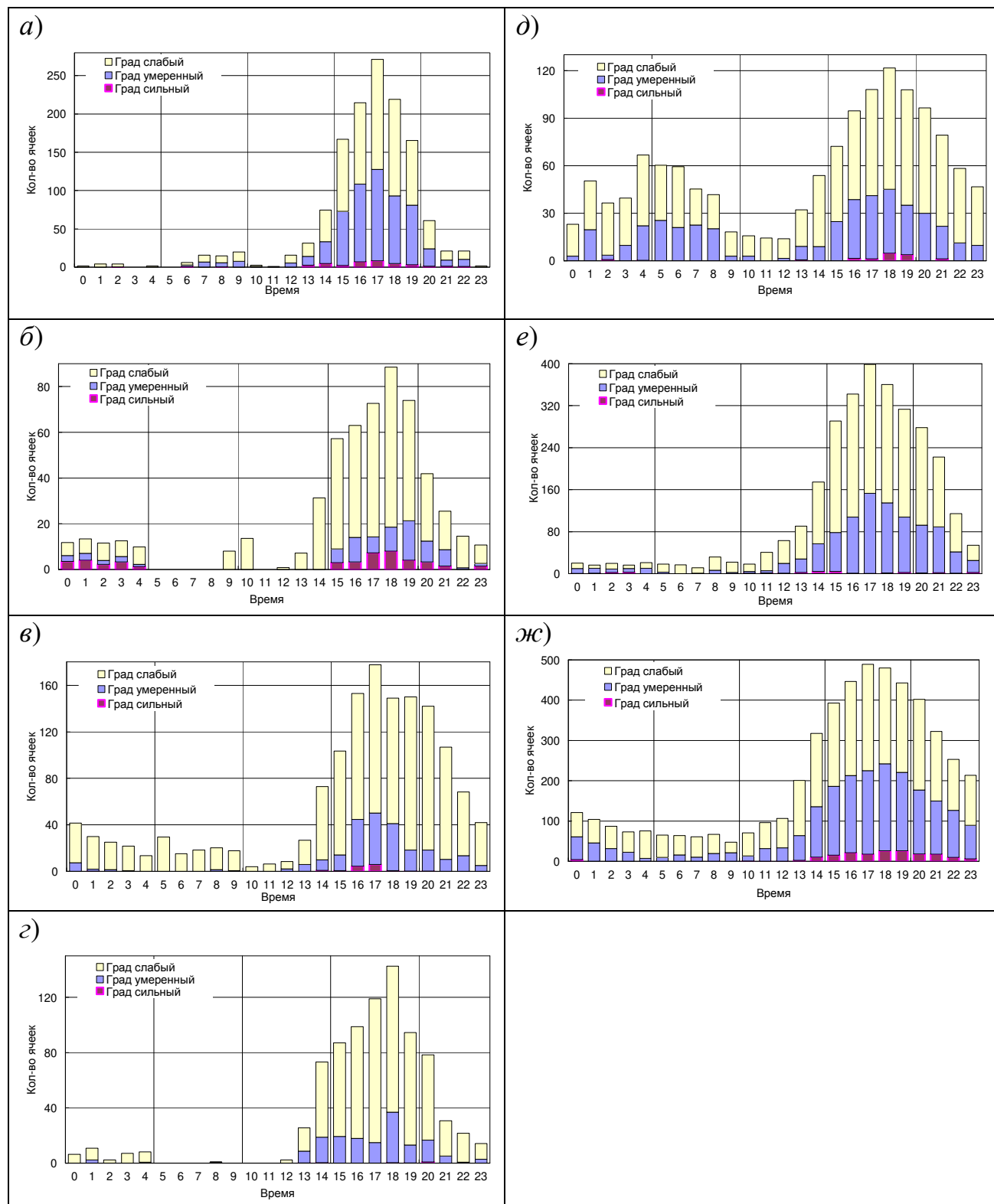


Рис. 4.7 Суточный ход числа градовых КЯ, осредненный по всем месяцам сезона: а) 2002 г., б) 2003 г., в) 2004 г., г) 2005 г., д) 2006 г., е) 2007 г., и) 2008 г.

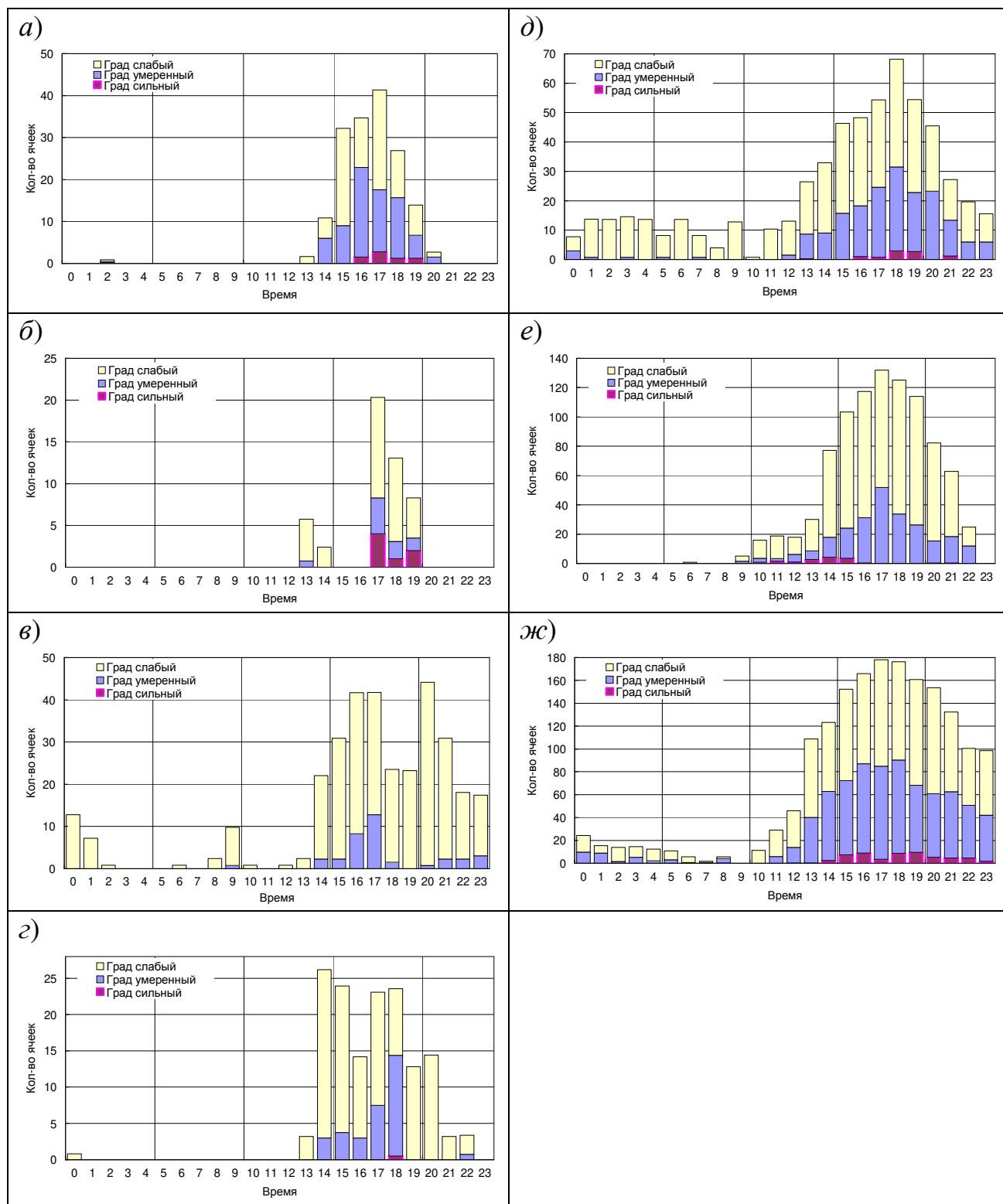


Рис. 4.8 Суточный ход повторяемости градовых КЯ в мае: а) в 2002 г., б) в 2003 г., в) в 2004 г., г) в 2005 г., д) в 2006 г., е) в 2007 г., ж) в 2008 г.

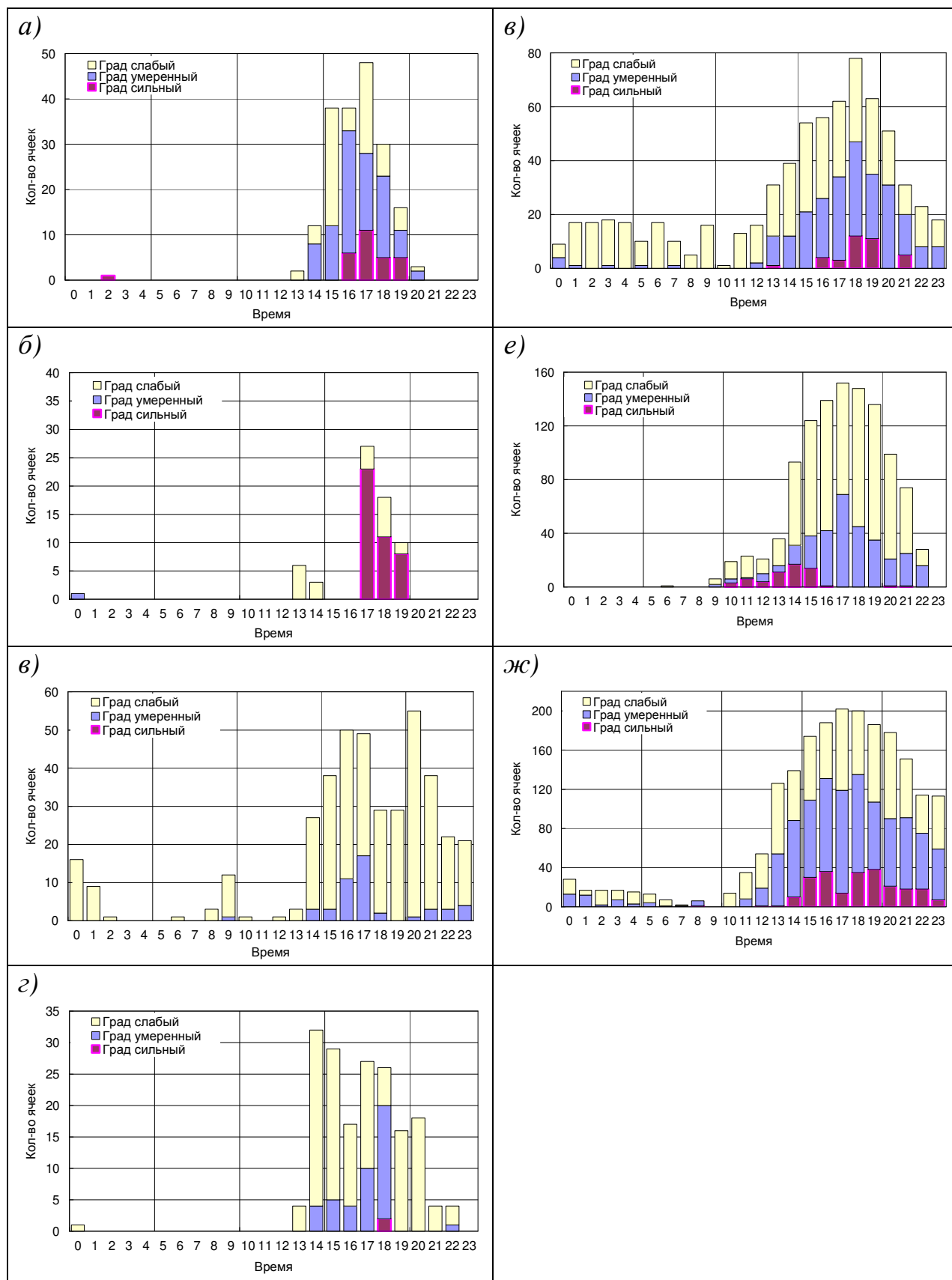


Рис. 4.9 Суточный ход повторяемости КЯ в июне: а) в 2002 г., б) в 2003 г., в) в 2004 г., г) в 2005 г., д) в 2006 г., е) в 2007 г., ж) в 2008 г., соответственно.

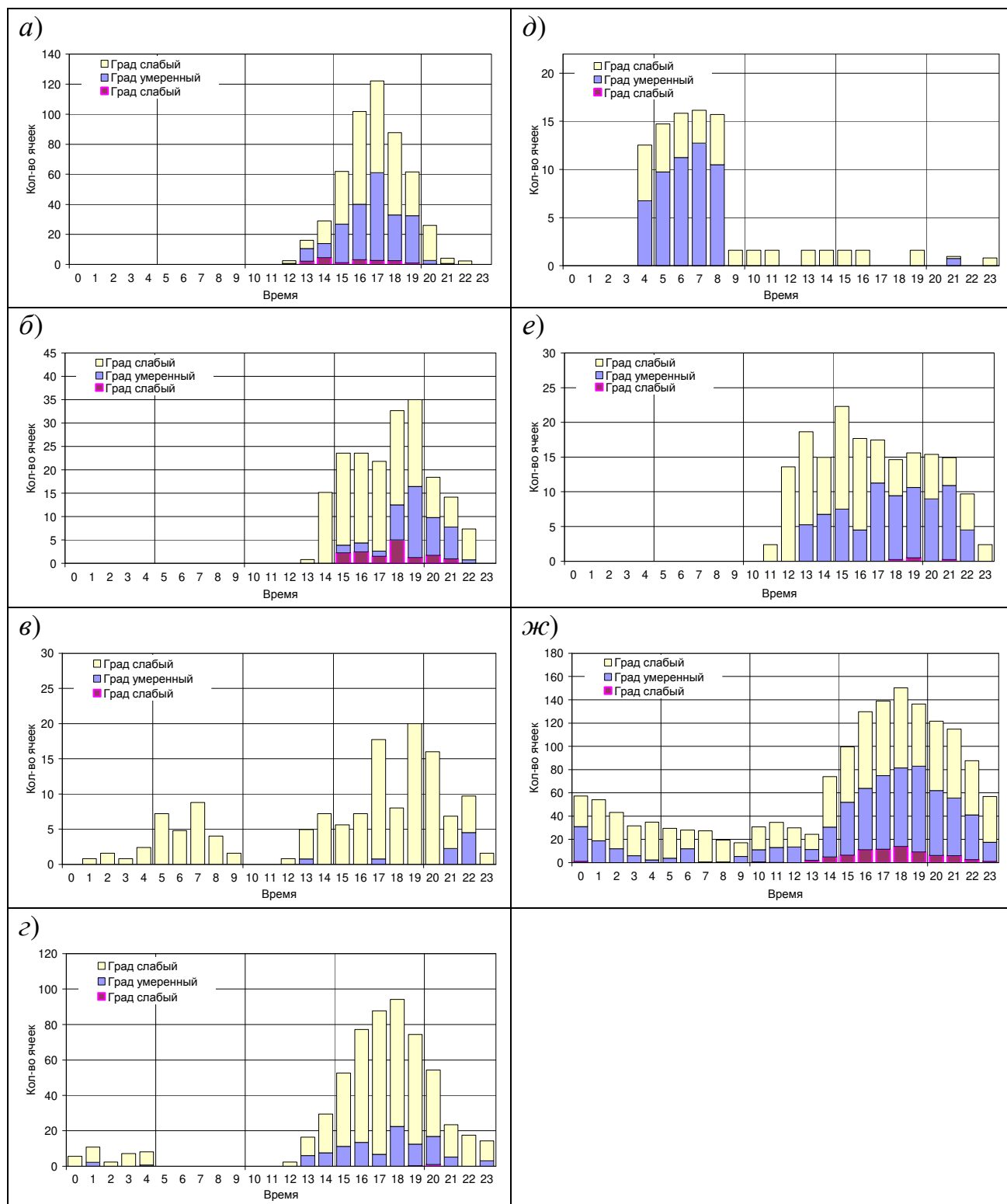


Рис. 4.10 Суточный ход повторяемости КЯ в июле: а) в 2002 г., б) в 2003 г., в) в 2004 г., г) в 2005 г., д) в 2006 г., е) в 2007 г., ж) в 2008 г., соответственно.

Одной из особенностей, наглядно показанной на рис. 4.24, является то, что в июле 2006 г. подавляющее большинство градовых КЯ отмечалось в утренние

часы с 04<sup>00</sup> до 08<sup>00</sup>. Это обусловлено прохождением холодных фронтов через район наблюдений именно в эти часы.

Из рис. 4.11 следует, что много ночных градовых процессов отмечалось в августе 2003 и 2007 гг., включая и мощные градовые КЯ (особенно в 2003 г.).

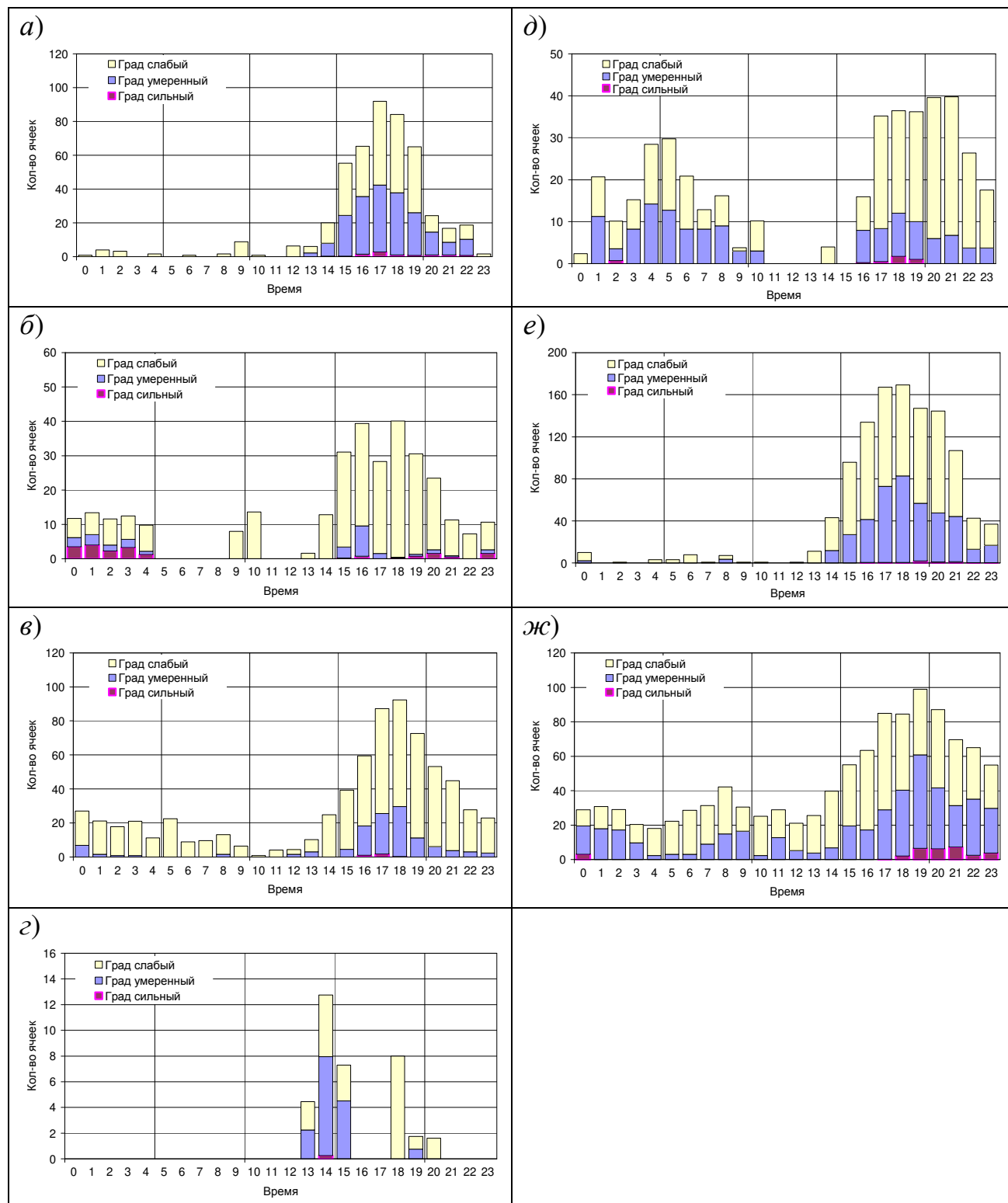


Рис. 4.11 Суточный ход повторяемости КЯ в августе: а) в 2002 г., б) в 2003 г., в) в 2004 г., г) в 2005 г., д) в 2006 г., е) 2007 г., ж) в 2008 г., соответственно

4.1.6. Одним из факторов, влияющих на выпадение града на земле, является высота нулевой изотермы  $H_0$ , определяющая путь таяния града в теплой части атмосферы [93,138].

Результаты анализа высоты  $H_0$  в дни с градовыми процессами представлены на рис. 4.11, из которого следует, что среднее значение  $H_0$  в июне, июле и августе с 2002 по 2006 гг. повышалось, а градовая активность менялась, при том по той же закономерности, что и годовой ход количества градовых ячеек рис 4.12. С 2006 по 2008 годы наблюдался рост количества градовых ячеек, и на графике среднего значения нулевой изотермы мы видим резкое падение значения высоты  $H_0$  в июне и августе, т.е. наиболее градоопасных месяцах (см. рис. 4.26 ).

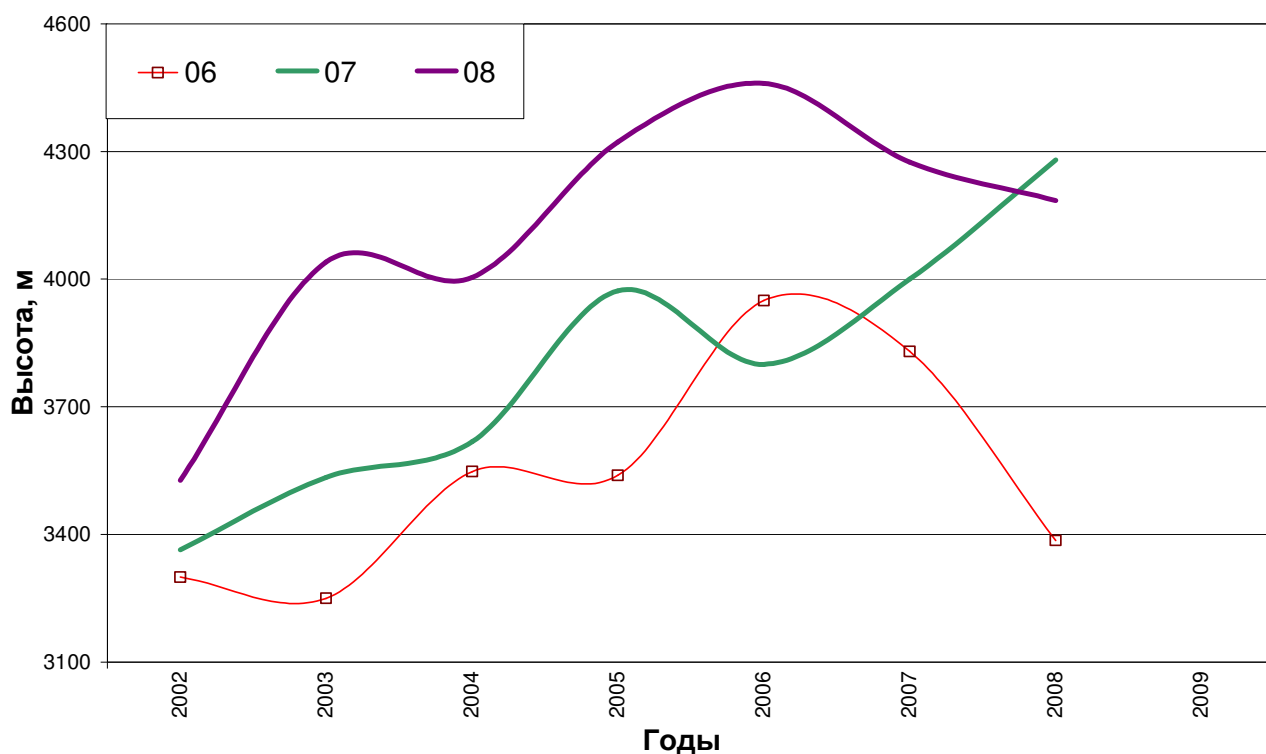
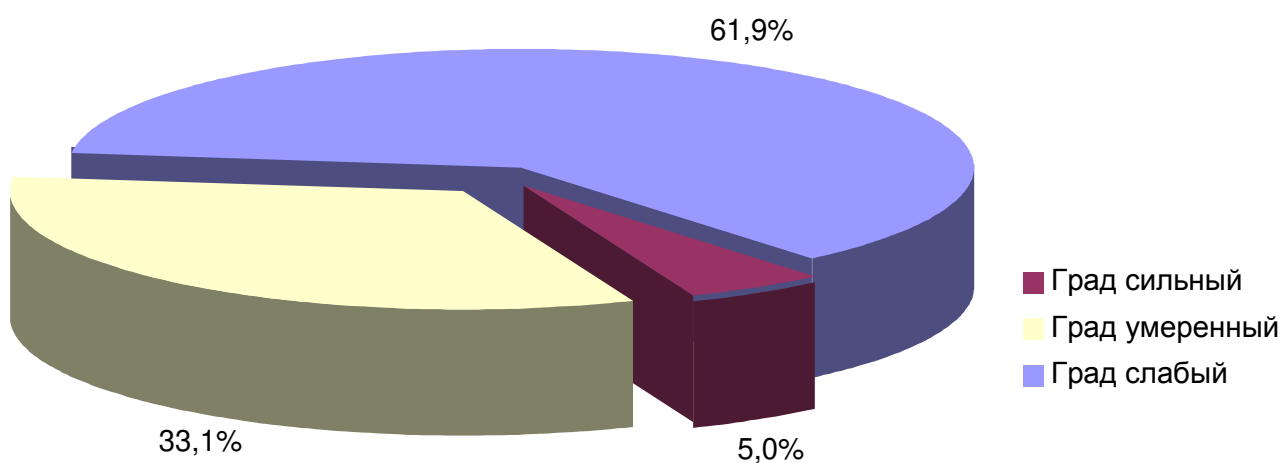


Рис 4.12 Среднее значение нулевой изотермы в июне, июле и августе в период с 2002 по 2008 гг. по данным радиозондирования атмосферы в аэропортах Краснодар и Минеральные Воды

4.1.7. Созданная система идентификации КЯ и автоматизированная обработка больших массивов данных радиолокационных обзоров позволяют оперативно провести аналогичные исследования градовой активности других регионов. Нами были проведены такие исследования не только по Ставропольскому краю, но и по Крымской области и получены закономерности годового и суточного распределения числа дней с градом, а также соотношения слабых, средних и сильных градовых КЯ [317].

Обработано 72873 файла обзора за период с 2002 по 2009 гг. (за исключением 2006 г., по которому мы не имеем данных). За 5 лет в радиусе действия АМРК «АСУ-МРЛ» Кировского отряда Крымской противоградовой службы было обнаружено 12 340 градовых КЯ, в том числе слабых 7639, средних 4082 и мощных 619. Как видно из рис. 4.13, в Крыму отмечается несколько иное, чем в Ставропольском крае, соотношение слабых, средних и мощных градовых КЯ. Доля мощных градовых ячеек в Крыму вдвое превышает их долю на Северном Кавказе. Другой особенностью градовых процессов Крыма являются малые масштабы градовых КЯ и кратковременность их существования, что объясняет относительно большое их



количество.

Рис. 4.13 Число слабых, средних и мощных градовых КЯ в Крыму по данным АМРК «АСУ-МРЛ» Кировского отряда Крымской противоградовой службы, осредненное за 5 лет (2004, 2005, 2007 – 2009 гг.)

Анализ повторяемости градовых КЯ по годам, представленный на рис. 4.14, показывает, что общее число градовых КЯ в Крымской области в период 2004 – 2009 гг. почти не изменилось, хотя отмечается слабая тенденция увеличения числа мощных градовых ячеек. Наряду с естественными причинами на это могло повлиять и то, что площадь защиты, составлявшая около 25% площади Крыма, в последние годы сокращалась и в 2009 г. составляла всего 10%, по этой причине сокращалась доля засеянных градовых облаков.

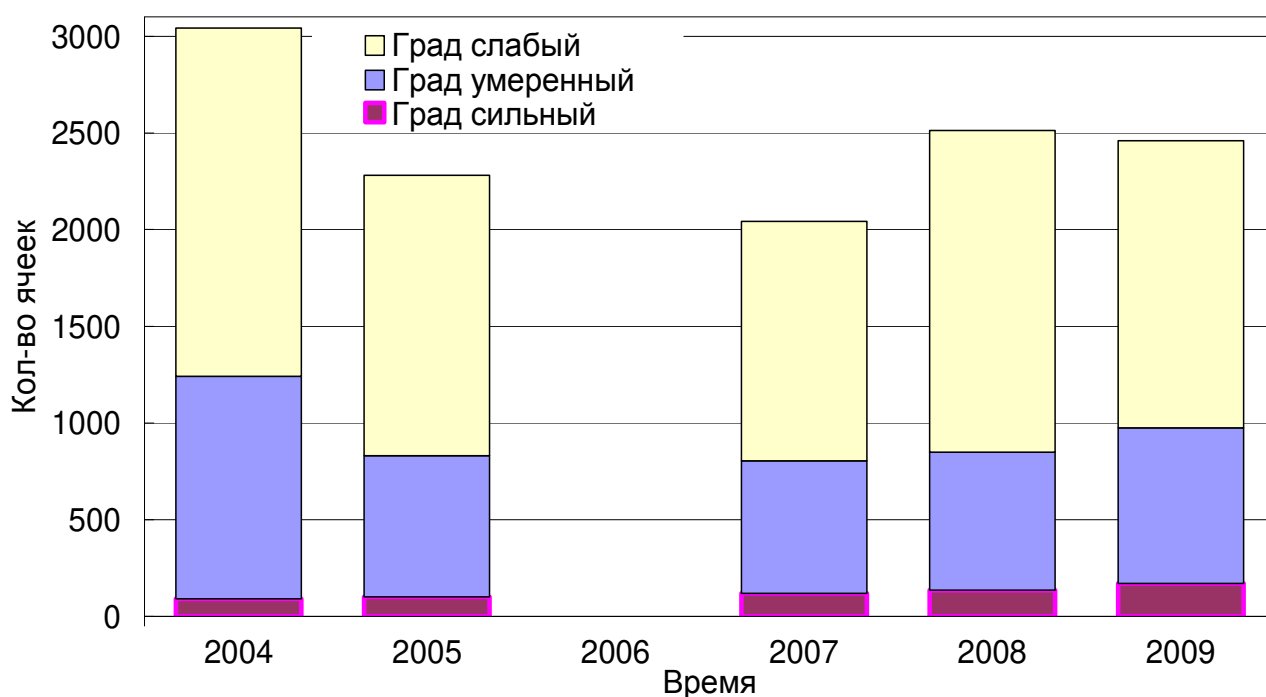


Рис. 4.14 Количество градовых ячеек в Крымской области в указанные годы

Сравнение повторяемости градовых КЯ Ставропольского края и Крымской области в течении трех наиболее градоопасных месяцев показывает, что в обоих регионах число градовых КЯ в августе во все годы исследований превышает их число в июне и июле (см. таблицу 4.1).

На рис. 4.14 представлен суточный ход повторяемости градовых КЯ в Крыму, осредненный за 2004 – 2009 гг. Из него следует, что в Крымской области максимум градовой активности наблюдается с 12<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup> местного времени с абсолютным максимумом в 15<sup>00</sup>.

Таким образом, в этом регионе период градовой активности отмечается на 3 часа раньше, чем в Ставропольском крае. Такой сдвиг во времени градовой активности является региональной особенностью градовых процессов, обусловленной, по-видимому, разными региональными условиями: в Крыму велико влияние Черного и Азовского морей, а в Ставропольском крае – влияние Главного Кавказского хребта и Ставропольской возвышенности.

Таблица 4.1 Процентное соотношение слабых, умеренных и мощных градовых ячеек в Ставропольском крае и Крыму

Год	Месяц	Став. край	Кры м	Став. край	Крым	Став. край	рым
		Сильный град, %		Умеренный град, %		Слабый град, %	
2004	Июнь	0	24,7	22,6	19,3	29,8	17,4
	Июль	0	17,7	5,2	12,1	13,3	14,1
	Август	100	57,6	72,2	68,6	57	68,4
2005	Июнь	25	46,7	20,7	27,2	19	41,4
	Июль	62,5	11,9	69,5	35,1	78,1	30,7
	Август	12,5	41,4	9,9	37,7	2,8	27,9
2007	Июнь	66,7	38,1	31,8	39,5	46,8	37,5
	Июль	4,6	5,4	10,8	8,2	6,2	7,8
	Август	28,7	56,6	57,4	52,3	47	54,7
2008	Июнь	34,5	34,5	41,3	40,1	39,1	39
	Июль	46,2	48,6	34,7	44,3	33,6	45,2
	Август	19,2	16,9	24	15,5	27,3	15,8

Аппроксимация суточного хода числа градовых ячеек  $N$  в Крыму, представленного на рис. 4.15, дает выражения:

– число КЯ со слабым градом:

$$N_C = 0,0003x^6 - 0,0089x^5 - 0,2144x^4 + 9,1608x^3 - 91,003x^2 + 300,73x - 140; (4.33)$$

– число КЯ с умеренным градом:

$$N_Y = 0,0002x^6 - 0,004x^5 - 0,14x^4 + 5,2665x^3 - 52,2x^2 + 174,82x - 83; \quad (4.1)$$

– число КЯ с интенсивным (сильным) градом:

$$N_H = 2 \cdot 10^{-05}x^6 + 0,0002x^5 - 0,048x^4 + 1,217x^3 - 10,9x^2 + 35,6x - 24. \quad (4.2)$$

где  $x$  – порядковый номер года, начиная с 2002 г.

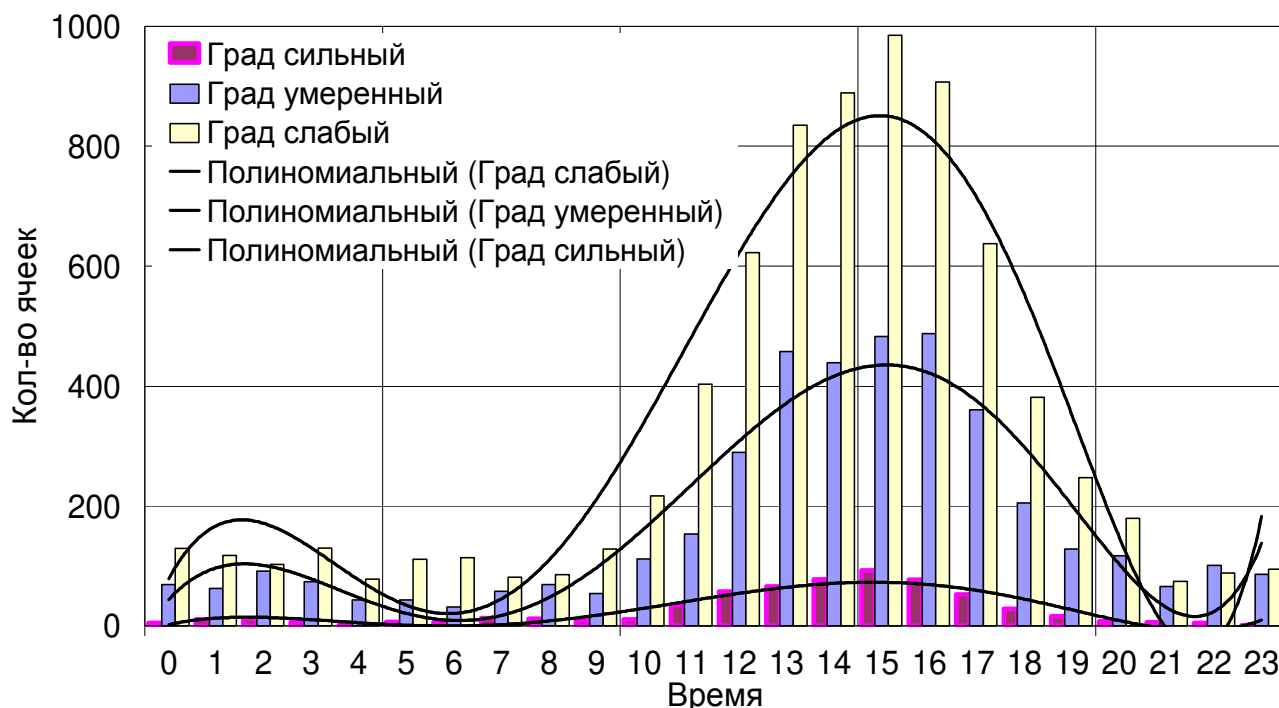


Рис. 4.15 Суточный ход числа градовых КЯ в Крыму, осредненный по всем дням наблюдений за 2004 – 2009 гг.

Анализ суточного хода градовой активности в Крыму показывает, что за счет того, что градовые процессы в ночное время развиваются в теплых секторах циклонов, в то время как в дневное время они формируются в основном в зонах холодных фронтов. Следовательно, в ночное время суток при отсутствии термической конвекции, связанной с прогревом подстилающей поверхности, образование града зависит от особенностей циркуляции в теплых секторах циклонов. Все это увеличивает количество ночных процессов, что мы и наблюдаем на рисунках 4.14 и 4.15.

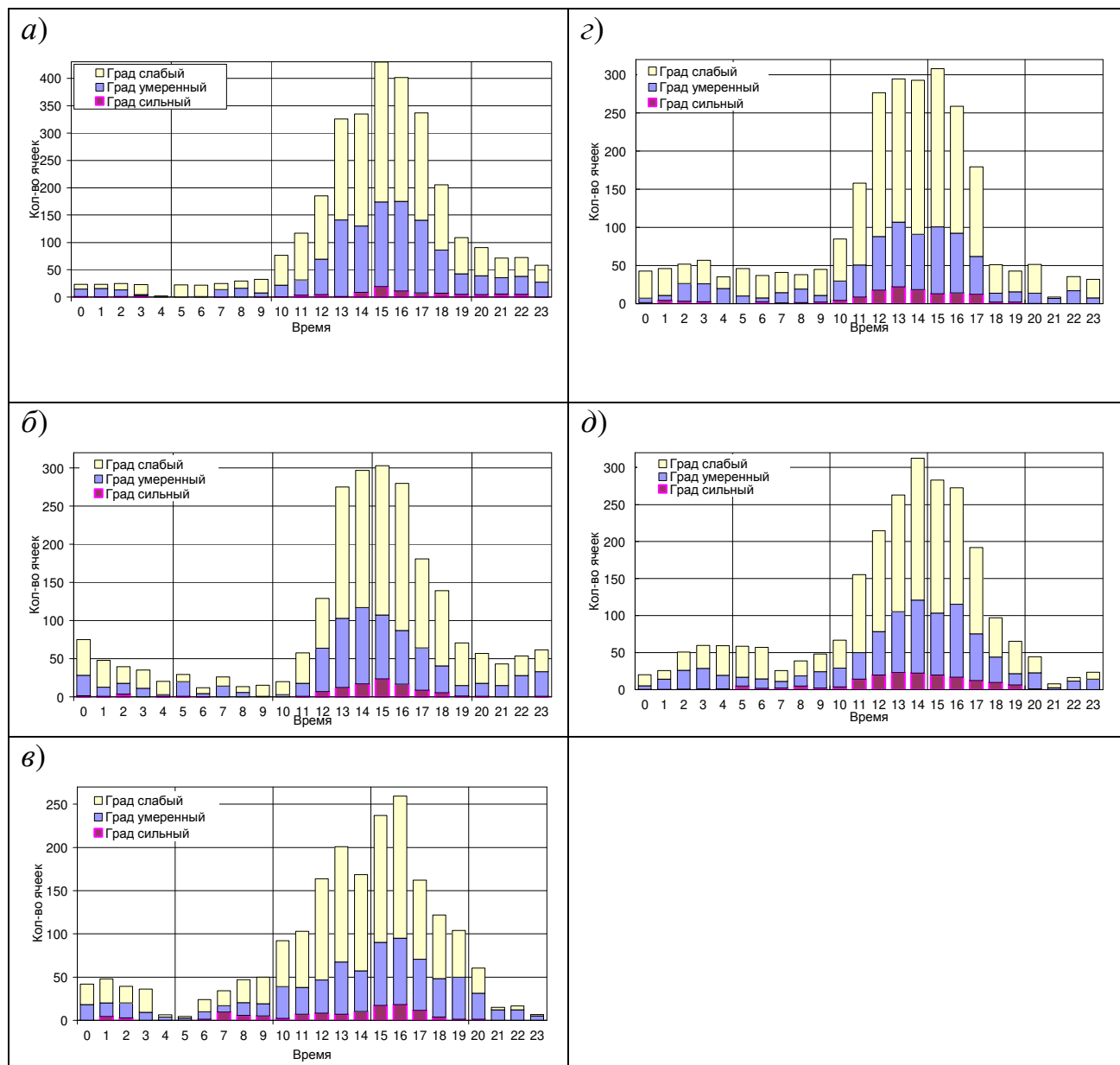


Рис. 4.16 Суточный ход числа градовых ячеек в Крыму по годам: а) 2004 г. б) 2005 г. в) 2007 г. г) 2008 г., д) 2009 г., соответственно, по данным Кировского «АСУ-МРЛ» Крымской противоградовой службы

Представленные данные о годовом и суточном ходе повторяемости градовых КЯ могут представлять интерес для планирования оперативной деятельности по воздействию на градовые процессы на практике противоградовой защиты.

## 4.2 Исследование распределения по высоте опасных для полетов авиации уровней отражаемости

Большую важность для полетов авиации имеют данные о повторяемости опасной облачности по высотам и эшелонам полета [5,190,195]. В качестве одного из параметров, характеризующих степень опасности облачности, взята радиолокационная отражаемость, значения которой коррелирует с наличием турбулентности, зон обледенения, больших скоростей воздушных потоков, интенсивных осадков, в том числе и опасности встречи с градом. В качестве одного из параметров, характеризующих степень опасности облачности, является наличие грозových разрядов, как правило, свидетельствующих о наличии в облаке отражаемостей выше 35 dBZ, значения которых коррелирует с наличием турбулентности, больших скоростей воздушных потоков, интенсивных осадков, в том числе и опасность встречи с градом [165,190].

Поэтому для исследования частоты опасных для полетов авиации параметров облаков была выбрана радиолокационная отражаемость, и по всему массиву данных наблюдений Ставропольского «АСУ-МРЛ» в 2002 – 2008 г. были построены карты псевдогоризонтальных сечений на 32 уровнях высот от 0 до 16 км с шагом 0,5 км, и на каждой рассчитана повторяемость точек со значениями радиолокационной отражаемости  $Z$  от 10 до 70 dBZ с шагом 5 dBZ.

Было обработано 125 186 объемных файлов радиолокационного обзора пространства, содержащих  $324 \cdot 10^9$  пространственных точек размером 0,5x0,5x0,5 км во всех указанных выше 703 726 КЯ.

На рис. 4.17 показаны кривые повторяемости числа пространственных точек размером 0,5 x 0,5 x 0,5 км со значениями отражаемости  $Z > 20, 30, 40, 50, 60$  и 70 dBZ в зависимости от высоты над уровнем моря. Из этого рисунка следует, что частота опасных 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 общего числа точек. Высота опасного с точки зрения грозоопасности уровня отражаемости с  $Z > 30$  dBZ отмечается в 0,01 % случаев наблюдений 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 и интенсивный град.

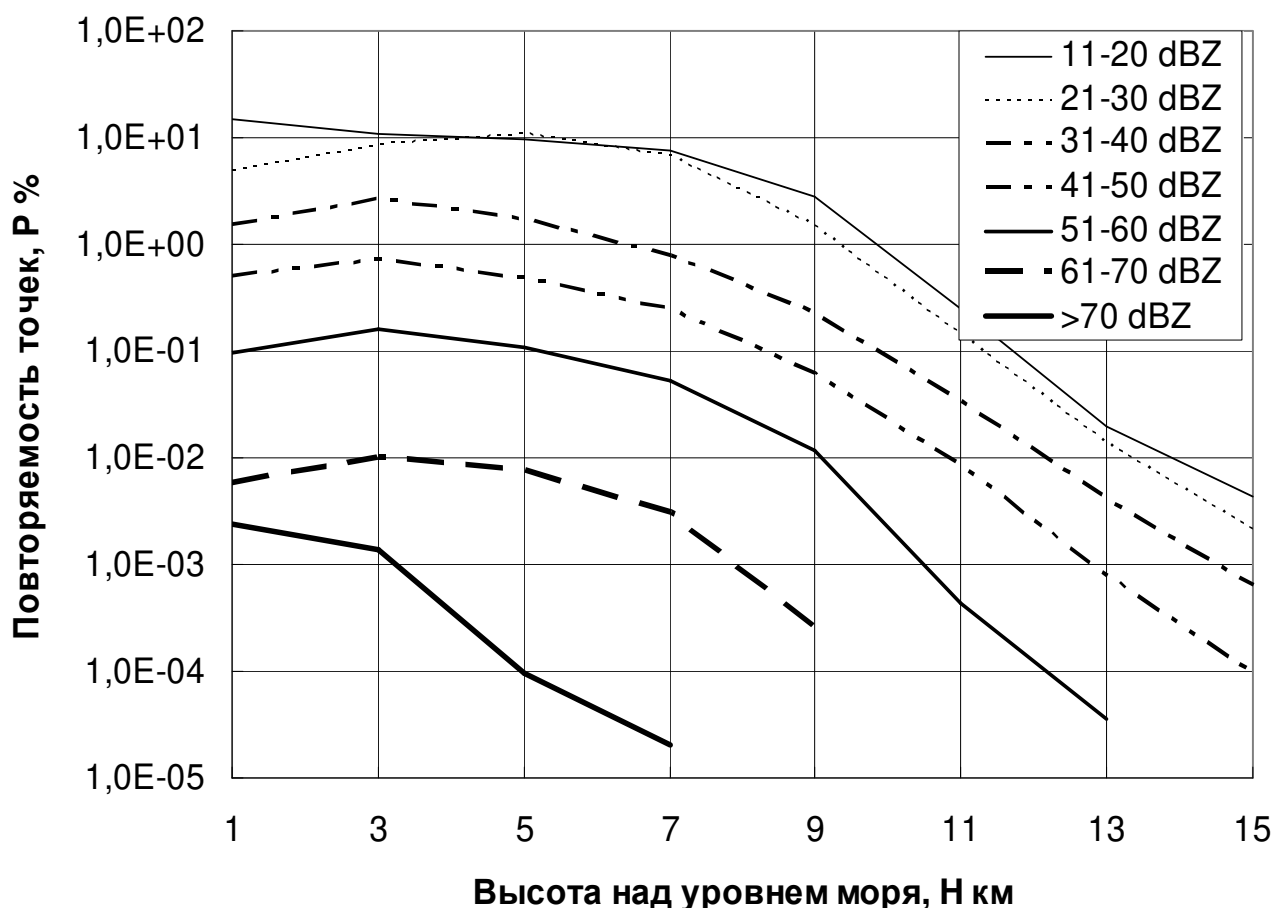


Рис. 4.17 Повторяемость пространственных точек с указанными значениями радиолокационной отражаемости  $Z$  (dBZ) в зависимости от высоты над уровнем моря, полученная по данным наблюдений Ставропольского «АСУ-МРЛ» в период 2002-2005 гг.

На рис. 4.18 показана зависимость числа пространственных точек с отражаемостью  $Z > 10, 20, 30 \dots 70$  dBZ от высоты в мощном градовом процессе, наблюдавшемся 30.08.2008 г. В этом процессе область локализации града и даже крупного града (с  $Z > 60$  dBZ) распространялась до высоты 11 км над уровнем моря, хотя число таких пространственных точек не превышает

$10^4$ , при общем числе точек более  $3 \cdot 10^6$  (т.е. не превышает 0,33 %). Тем не менее, пролеты самолетов через такие облака даже на эшелонах около 9 км могут быть крайне опасны.

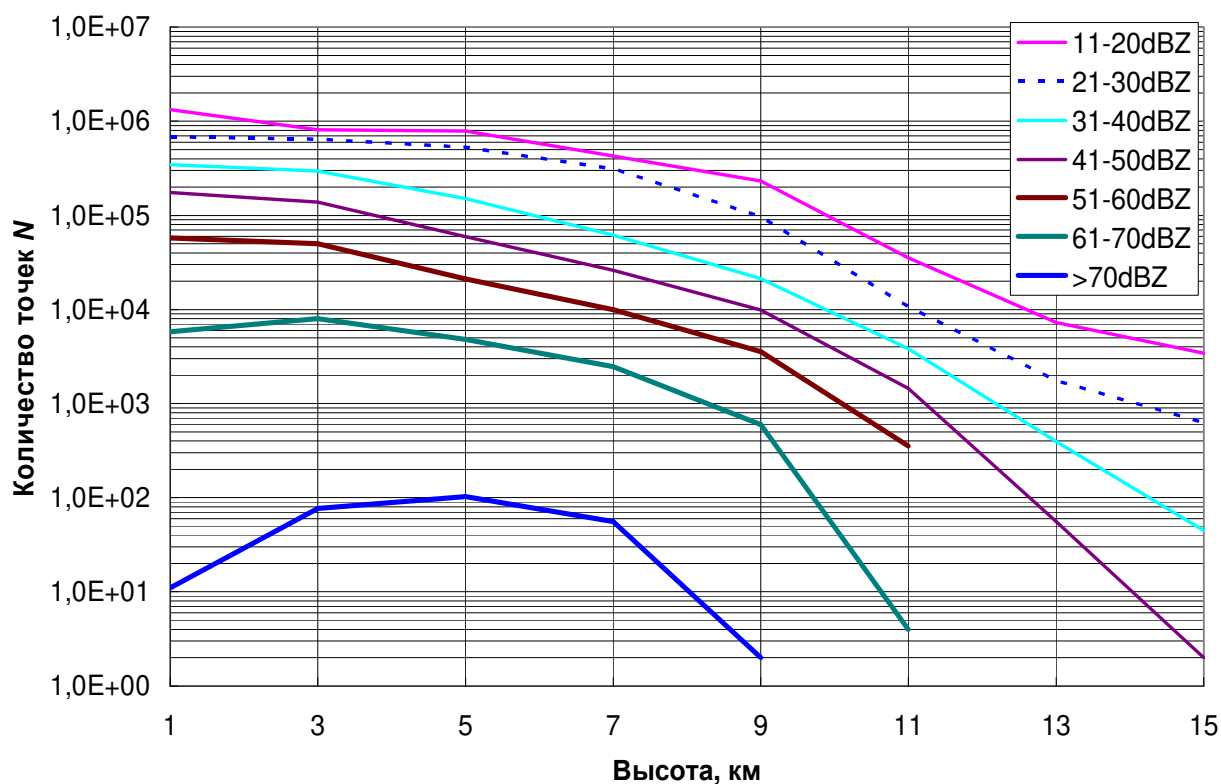


Рис. 4.18 Количество пространственных точек с указанной отражаемостью в зависимости от высоты в мощном градовом процессе, наблюдавшемся в Краснодарском и Ставропольском краях 30.08.2018 г.

На рис. 4.19 представлен временной ход числа пространственных точек, имеющих отражаемость в интервале  $Z = 0 - 45$ ,  $46 - 55$ ,  $56 - 65$  и  $> 65$  dBZ в облачном слое от 0 до 16 км в мощном градовом облаке, наблюдавшемся 30.08.2008 г. Этот рисунок позволяет оценить соотношение числа точек по мере повышения степени опасности явлений погоды. Видно, что по мере развития градового процесса число пространственных точек возрастает и, следовательно, объемы локализации града и крупного града увеличиваются. Такие графики можно построить за любой выбранный день, период наблюдений, год и многолетний период для создания банка данных для различных целей. По аналогии можно получить повторяемость точек

локализации других явлений погоды и их характеристик по любому облачному слою.

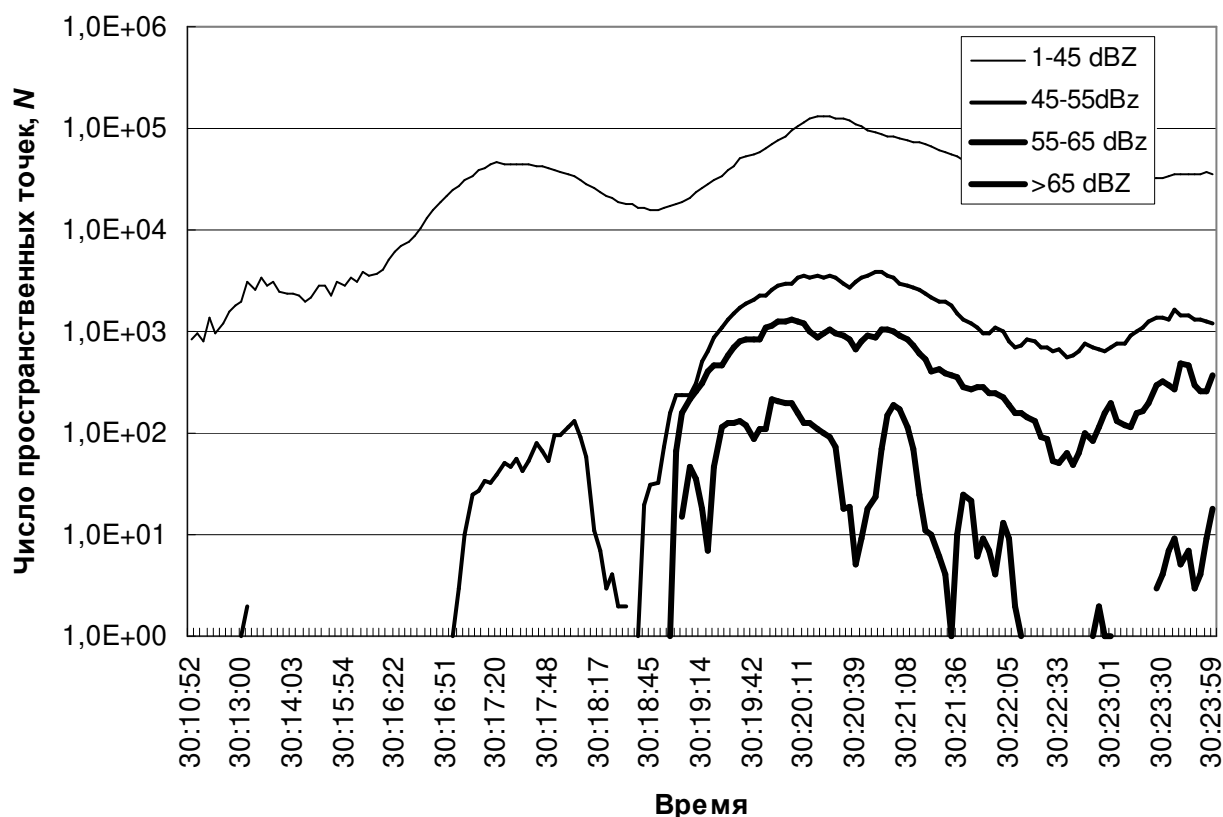


Рис. 4.19 Зависимость числа пространственных точек с указанной отражаемостью от времени в период развития, квазистационарного состояния и диссипации мощного градового процесса 30.08.2018 г.

На рис. 4.20 представлен пример получения карты градовых КЯ, на которой автоматически указывается вектор ведущего потока (показан синим цветом) и вектор направления и скорости перемещения каждой КЯ (показан красным цветом). Длина векторов ведущего потока и вектора перемещения КЯ пропорциональны скорости перемещения, численное значение которой указано на конце вектора. Получение такой карты в реальном масштабе времени позволяет оперативно оценить направление перемещения каждой КЯ, сравнить с направлением и скоростью ведущего потока и обеспечить удобство оператору по воздействию на градовые процессы, а также руководителю полетов авиации, на экран которого выводится такая картина (например, в Волгоградском

аэропорту Гумрак).

В представленном примере в 19<sup>21</sup> отмечаются одна мощная и одна развивающаяся градовые ячейки с правосторонним развитием, которые движутся вправо от направления ведущего потока и отстают от него примерно в 1,5 раза. В 19<sup>35</sup> уже отмечаются две мощные градовые ячейки, перемещающиеся со скоростью 52 и 54 км/час, а также три развивающиеся.

Таким образом, разработанные методы, алгоритмы и программы обработки радиолокационной информации позволяют получить детальную информацию, необходимую для решения различных прикладных задач: активное воздействие на облачные процессы, штормоповещение, обеспечение безопасности полетов авиации и т.д.

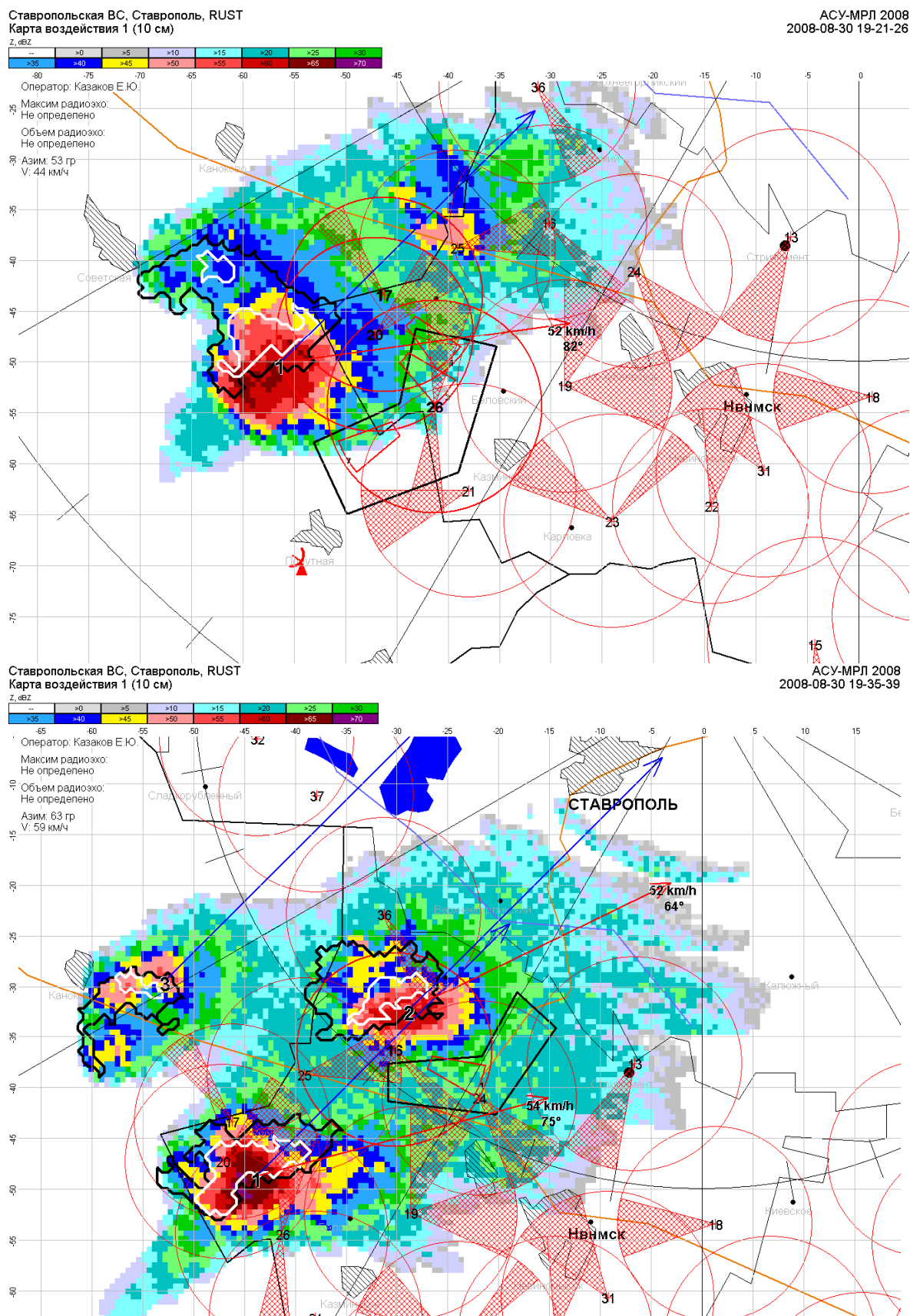


Рис. 4.20 Пример карты двухуровневого сечения градовых облаков 30.08.2008 г. в 19<sup>21</sup> и 19<sup>35</sup> с векторами ведущего потока (синий цвет) и векторами направления и скорости перемещения КЯ (красный цвет).

### **4.3 Повышение информативности исследования грозоградовых процессов**

В последнее десятилетие требования к качеству информации о грозах заметно возросли. Если раньше для статистических исследований грозовой активности использовались в основном радиолокационные данные или данные метеостанций и постов, то в последнее время к ним добавилась грозопеленгационная информация [213,215,226]. Перечисленные данные имеют свои преимущества и недостатки. Радиолокационная информация позволяет охватывать большие площади, при этом данные о грозах, получаемые в результате обработки такой информации, носят вероятностный характер [56,216]. Наблюдения за грозами на метеорологических станциях и постах дают достоверную информацию лишь в небольшом радиусе и во многом определяются человеческим фактором. Получившие развитие сравнительно недавно грозопеленгационные сети обеспечивают получение информации с обширных площадей, а также позволяют, инструментальными методами фиксировать и определять характеристики разрядов [157,217-222]. Объединение различных типов метеорологической информации и оценка степени достоверности данных наблюдений для статистических исследований грозоградовой активности является важной и актуальной задачей.

#### **4.3.1 Повышение достоверности временных рядов данных радиолокационной и грозопеленгационной информации**

Радиолокационные данные, используемые в исследованиях, получены со стабильно и непрерывно работающего МРЛ-5, на базе автоматизированных систем «Антиград» и «АСУ МРЛ».

Грозопеленгационная сеть (ГПС) Северного Кавказа функционирует с 2009 г. LS8000 является современной многопунктовой грозопеленгационной системой, в которой точность определения молниевых разрядов (МР) зависит от плотности расположения станций.

ГПС Северного Кавказа включает 4 грозорегистратора, расположенных в г. Михайловск и Зеленокумск, Ставропольского Края, в с. Исламей (КБР) и г. Черкесск (КЧР). Исследуемая территория находится в зоне устойчивого пеленга молниевых разрядов восемью грозорегистраторами.

При статистическом анализе любой информации, в том числе и грозопеленгационной, большую роль играет объем и достоверность обрабатываемых данных. В рамках данной работы была модифицирована и дополнена программа статистической обработки грозопеленгационной информации. Для определения однородности и достоверности временных рядов грозопеленгационной информации был использован авторский алгоритм, реализованный в программном комплексе, согласно которому:

- по данным архива грозопеленгационной информации осуществляется разделение разрядов по дням их фиксации и количеству грозорегистраторов участвующих в выявлении (регистрации) молниевых разрядов;

- для каждого дня с грозой выполняется сопоставление количества молниевых разрядов, зафиксированных низкочастотными (LF) и высокочастотными (VHF) датчиками.

Расхождение в динамике показаний, полученных по низкочастотным (LF) и высокочастотным (VHF) датчикам, в конкретные дни свидетельствует о сбоях в их работе.

Резкое отклонение доли молниевых разрядов в конкретный месяц от его среднего значения за период с 2009 по 2020 гг. также является косвенным свидетельством неточной фиксации разрядов из-за сбоев работы ГПС в рассматриваемый период времени.

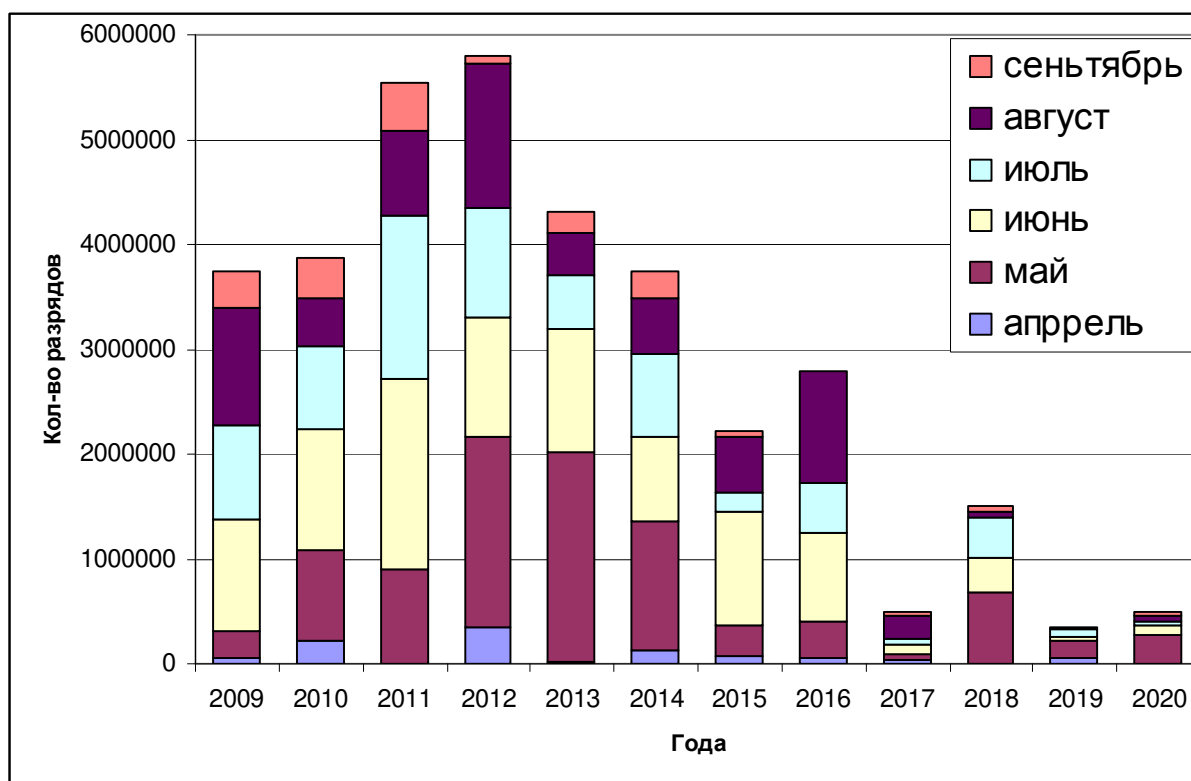


Рис. 4.21 Годовой ход молниевой активности, разрядов типа облако-облако в период с 2009 по 2020 гг.

Накопленная к настоящему времени грозопеленгационная информация не позволяет судить о цикличности грозовой активности на Северном Кавказе. Но поскольку град и гроза — явления погоды тесно связанные между собой, можно ожидать, что динамика временного хода грозовой активности будет идентична градовой, рассмотренной в работе автора, в которой градовые облака на исследуемой территории за 2002–2018 гг. идентифицировались и учитывались с помощью метода автоматической идентификации конвективных ячеек.

Для сопоставления грозопеленгационной и радиолокационной информации использовались данные низкочастотных датчиков, т.к. данные полученные VHF датчиками были подвержены более частым сбоям, о чем свидетельствует расхождение графиков на рисунке 4.20 и 4.21.

Статистический анализ грозопеленгационной и радиолокационной информации показал, что, грозовая активность подобно градовой активности нарастала с 2011 по 2015 гг., а также с 2017 по 2018 гг. (рис. 1). Теоретически,

пик молниевой активности подобно градовой (рис. 1а) должен был приходиться на 2016 год, но фактически значительно больше молний было зафиксировано в 2014 году (рис. 1б). Это можно связать с нестабильной работой LF датчиков ГПС в 2016 году.

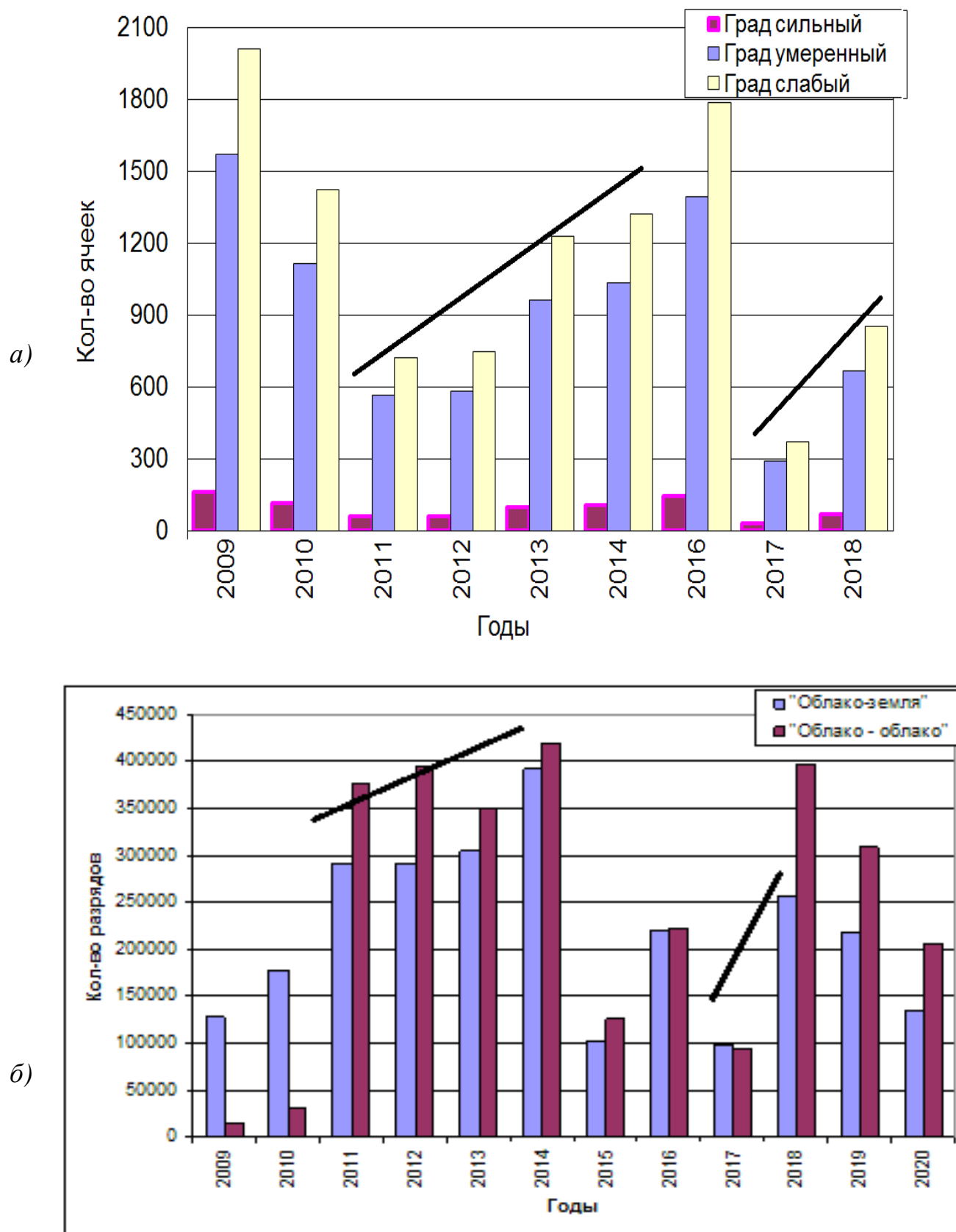


Рис. 4.22. Количество а) градовых ячеек по данным МРЛ-5, б) молниевых разрядов, зафиксированных низкочастотными датчиками (LF) в 2009–2020 гг.

### 4.3.2 Анализ выявленных сбоев работы ГПС

Исследуемая территория представляет собой область площадью 173 км<sup>2</sup>, центр которой расположен в районе г. Михайловск Ставропольского края. Данная площадь включает в себя все типы рельефов местности от низменностей до высокогорий. Неоднородный рельеф накладывает дополнительные требования к количеству датчиков, участвующим в пеленге МР.

За период 2009–2020 гг. на исследуемой территории высокочастотные датчики (VHF) зафиксировали 35 046 305 молниевых разрядов, из них в определении 78,4 % разрядов участвовали два, в 18,6 % — три, в 2,7 % — четыре, в 0,25 % — 5 и более грозорегистраторов.

Низкочастотные датчики (LF) зафиксировали 6419407 молниевых разрядов, из которых 44,7 %, 35,7 %, 12,3 % разрядов было зафиксировано соответственно двумя, тремя и четырьмя датчиками.

Данные о среднем дневном количестве, зафиксированных разрядах приведены на рис. 4.23.

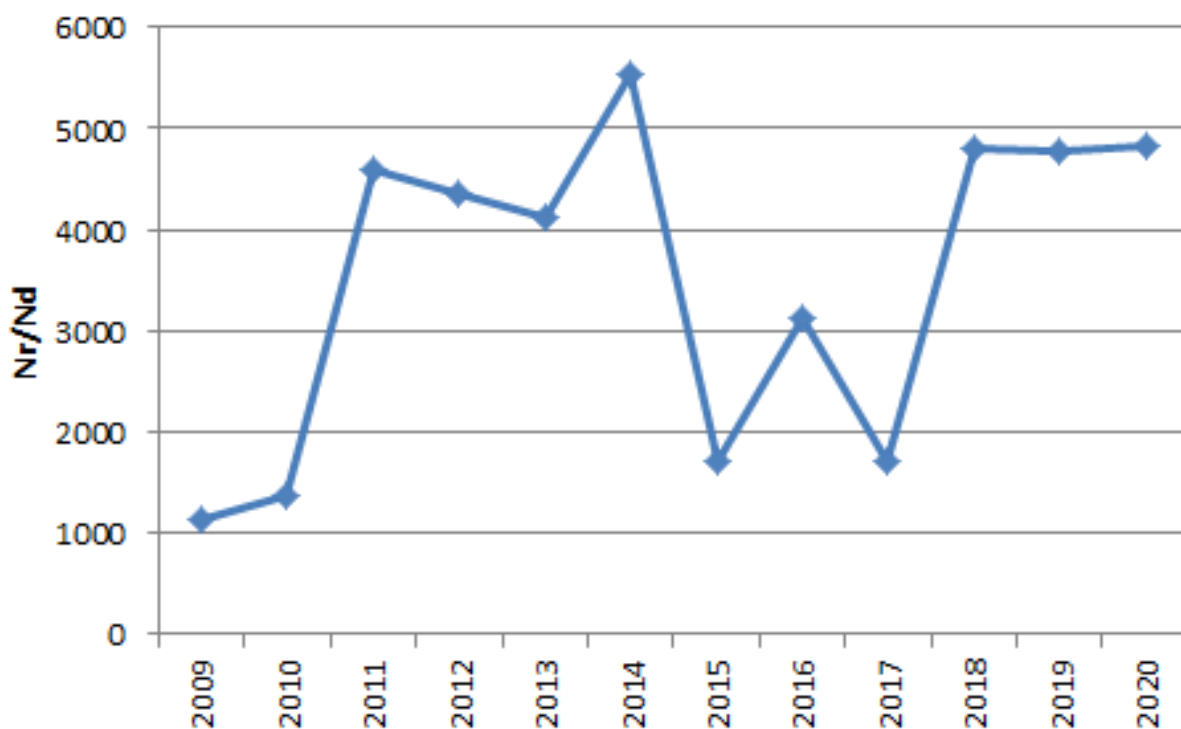


Рис. 4.23 Среднее за день количество разрядов «облако-земля» в период с апреля по сентябрь

Разряды в большинстве случаев фиксируются двумя грозопеленгаторами, что свидетельствует о частых сбоях тех или иных датчиков ГПС.

По отклонениям доли МР за месяц от ее среднего многолетнего значения, можно судить о сбоях работы LF датчиков в определенные месяцы или сезоны (таблица 4.2). В частности, результаты, полученные в апреле 2011, 2013, 2018-2020 гг., мае 2009 и 2016 гг. июне 2015 г, июле 2009 и 2015 гг., 2018 гг., августе 2010, 2016, 2018 и 2019 гг., в сентябре 2010, 2016, 2019 гг., свидетельствуют о сбоях в работе Северо-Кавказской ГПС.

Таблица 4.2 Доля МР, зафиксированных низкочастотными датчиками за месяц относительно общего числа разрядов за грозовой сезон

Год	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
2009	1,3	7,6	23,4	37,7	20,6	9,5
2010	1,9	12,1	35,4	19,7	7,9	23
2011	0,1	10,3	30,3	29,2	22,1	8,1
2012	3	28,3	22,9	19,8	23,9	2,0
2013	0,2	21,6	29	25,7	18,6	4,9
2014	4,0	29,4	18,3	23,7	18	6,6
2015	2	10,2	44,4	11,9	24,8	6,8
2016	1,9	10	25,6	17,2	44,1	1,3
2017	1,3	13,5	27,9	22,4	29,9	5
2018	0,3	20,9	13,3	47,4	11,2	6,9
2019	5,5	19,7	31,3	33,4	9,7	0,5
2020	0	20,2	18,2	35,9	13,4	12,3
среднее	1,8	17	26,7	27	20,3	7,2

В результате исследования молниевой активности на Северном Кавказе было выявлено, что наиболее грозоопасными месяцами для всех типов разрядов являются июнь и июль (табл. 4.3). В 2012 - 2014 гг. наибольшее количество

молниевых разрядов типа «облако-облако», приходится на май. В 2016 г. наибольшее количество гроз было зафиксировано в августе.

Таблица 4.3 Доля (%) молниевых разрядов типа «облако-облако» за месяц относительно суммарного годового количества разрядов, зафиксированных на исследуемой территории за 2009-2020 гг.

Год	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
2009	1,2	6,9	28,4	24,1	29,9	9,5
2010	5,9	22,1	29,8	20,4	11,9	10
2011	0,1	16,2	32,6	28,3	14,6	8,3
2012	6,1	31,2	19,7	18,2	23,8	1,1
2013	0,5	46,2	27,3	12,1	9,5	4,6
2014	3,6	32,6	21,6	21,0	14,1	7,1
2015	2,9	13,7	48,9	8,0	24,3	2,2
2016	2,2	12,3	30,3	17,0	37,9	0,3
2017	6,9	11,7	17,1	12,7	45,8	5,9
2018	0,3	44,5	22,2	26,0	3,8	3,2
2019	18,5	45,3	11,4	22,8	2,1	0
2020	0	55,8	17,3	10,0	9,4	7,5
среднее	4,00	28,2	25,5	18,4	18,9	5

Основываясь на данных о доле молниевых разрядов типа «облако-облако» за месяц относительно суммарного годового количества разрядов, по значительным отклонениям от среднестатистического распределение молниевых разрядов и по данным годового хода молниевой активности можно сделать вывод о нарушении однородности грозопеленгационных данных, возможно, по причине сбоев в работе датчиков VHF (Таблица 4.4). В частности, в апреле 2011,2013,2018-2020 гг., мае 2018-2020 гг. июне, июле 2015 г, августе 2013, 2016, 2017,2018-2020 гг. и в сентябре 2012,2019 гг.

Таблица 4.4 Отношение количества молниевых разрядов VHF к количеству разрядов LF на исследуемой территории

Год	HF/LF					
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
2009	24,7	22,9	30,7	16,1	36,7	25,2
2010	55,7	33,2	15,2	18,7	27,2	7,8
2011	7,7	12,7	8,7	7,8	5,3	8,2
2012	16,3	9,1	7,1	7,5	8,2	4,6
2013	13,7	13,4	5,9	2,9	3,2	5,9
2014	3,9	4,8	5,1	3,9	3,4	4,6
2015	13,1	12,1	9,9	6,0	8,8	2,9
2016	6,4	6,8	6,5	5,4	4,7	1,1
2017	10,9	1,8	1,3	1,2	3,2	2,5
2018	1,9	4,2	3,3	1,1	0,7	0,9
2019	1,7	1,1	0,2	0,3	0,1	0
2020	1,5	2,5	0,8	0,2	0,6	0,5
средн ее	13,1	10,4	7,9	5,9	8,5	5,4

Количество разрядов, зафиксированных с помощью датчика LF, не может превышать количество разрядов, зафиксированных с помощью датчика VHF в один и тот же период времени на одной и той же территории. Из таблицы 3 видно, что в августе, сентябре 2018 года, в июне, июле, августе и сентябре 2019, 2020 гг. в грозопеленгационной сети Северного Кавказа наблюдались явные сбои в фиксации разрядов типа «облако-облако».

#### **4.4 Статистический анализ характеристик молниевых разрядов на территории Северного Кавказа**

Молнии с незапамятных времен вызывали интерес у исследователей, т.к. всегда сопровождали опасные явления погоды [253-260]. Статистические исследования грозовой активности Северного Кавказа являются актуальной задачей, которой посвящено множество работ [23-28,32,34,35,41,42,64,79-81,98,100,142,144,152,154,155,236]. Оценка влияния рельефа на повторяемость грозовой активности исследуемой территории – это важная и актуальная задача, которой посвящено множество работ [53,78,251,252]. Вторжение воздушных масс вызывает активизацию конвекции в очаговых районах за счет конвергенции воздушных потоков в районах сужения долин и за счет вынужденного подъема воздуха на наветренных склонах с крутизной более 150 м [234].

Сложный рельеф территории Северного Кавказа в сочетании с географическим положением и особенностями господствующих здесь циркуляционных процессов обусловил здесь достаточно высокую грозовую активность. Горные хребты оказывают значительное влияние на вторгающиеся в регион воздушные массы, приводят к трансформации фронтальных систем и создают специфические условия для орографического цикло- и фронтогенеза. Вторжение холодного воздуха с севера и северо-востока, перпендикулярно Большому Кавказскому хребту, приводит к торможению фронтов на северных склонах. При обтекании Большого Кавказского хребта холодным фронтом с запада и северо-запада формируется фронт орографической окклюзии. Также рельеф интенсифицирует процесс волнообразования на основных фронтах, что способствует орографическому циклогенезу и усилению конвективных процессов. При малоградиентных барических полях, когда макроциркуляционные процессы в атмосфере ослаблены, проявляется местная горно-долинная циркуляция [33,78]. Эти особенности рельефа создают нестандартные условия развития грозовых процессов на территории Северо-Кавказских республик и в Ставропольском крае [53].

В данной работе проводится исследование грозовой активности в радиусе сканирования метеолокатора МРЛ-5 в г. Михайловск Ставропольского края с целью определения статистических особенностей грозовой активности в зависимости от рельефа местности. Данная территория была выбрана из-за охвата всего спектра рельефа, попадания в поле устойчивого пеленга четырьмя грозорегистраторами (рис.1.) (радиус пеленгации 325 км для разрядов типа «облако-облако») и возможностью дальнейшего сопоставления данных с радиолокационными данными [107,114].

В качестве исходного материала использовались грозопеленгационные данные типа «облако-облако» (VHF) сети грозорегистраторов LS8000, установленной на Северном Кавказе в 2008 году, позволяющей фиксировать в режиме реального времени все молниевые разряды, происходящие над всей территорией ЮФО и СКФО. О каждом молниевом разряде ГПС LS8000 получает следующие параметры: географические координаты местоположения молниевом разряда, время разряда, сила тока в канале молнии, полярность разряда и др. [113,118]

Были проведены статистические исследования разрядов «облако-облако» на Северном Кавказе и в Ставропольском крае в радиусе действия локатора МРЛ-5, расположенного в г. Михайловск, Ставропольского Края [119].

#### **4.4.1 Статистический анализ характеристик молниевых разрядов Облако-Облако на территории Северного Кавказа и в Ставропольском крае**

В работе анализировались такие характеристики разрядов, зафиксированные низкочастотными датчиками, как координаты разряда, сила и полярность тока в канале молнии.

Известно, что автоматизированная система фиксации разрядов, предоставляемая вместе с грозопеленгаторами LS8000, предназначена для автоматической регистрации, архивирования и визуализации информации в различных форматах: табличных данных, точек координат молний,

наложенных на карты местности, в виде цветной индикации на различных картосхемах и т.д. [30,31,33].

При этом основным предназначением автоматизированной системы является оперативная работа, она плохо адаптирована для научно-исследовательских целей. Перед нами стояла задача статистического анализа характеристик разрядов на определенной локальной территории, которая выбиралась с учетом уверенного пеленга всеми четырьмя грозопеленгаторами сети. Для этого была использована разработанная система автоматической обработки грозопеленгационной информации [110,113].

Был проведен статистический анализ грозовой активности на территории 173056 км<sup>2</sup>, все разряды были зафиксированы с помощью системы грозопеленгации LS800 (LS\_LH), при этом разряды «облако-облако» были разделены по квадратам фиксации молний, и равнялись 500x500 метров. Также для каждого элемента матрицы исследуемой территории была сформирована подложка значений высот рельефа над уровнем моря специальной программой, разработанной для исследования грозоградовых процессов [113]. Данная программа разрабатывалась для обработки радиолокционной информации, но была адаптирована под статистические исследования грозопеленгационных данных.

Для проведения исследований были сформированы две квадратные матрицы 832 на 832 значения, каждый элемент которой равнялся 0,25 км<sup>2</sup>. В первую матрицу были занесены данные цифровой модели рельефа (см.рис. 4.21). Далее программа подключалась к архивной базе грозорегистрационных данных типа «облако-облако» (LS\_LH). Последовательно перебирая архивные данные, географические координаты переводились в декартовы относительно локатора, находящегося в городе Михайловск Ставропольского края и, если координата попадала в ячейку матрицы, и молния фиксировалась в период с мая по сентябрь (в самый грозоопасный период года), то во второй матрице в заданном элементе происходило увеличение количества молний на единицу. В результате мы имели высоту рельефа и количество разрядов в каждом элементе матрицы.

В данной работе был проведен подсчет молниевых разрядов за период с 2009 по 2018 гг. В зависимости от орографии все молниевые разряды были разделены на 5 групп по координатам их обнаружения, при этом площадь исследуемых орографических кластеров составляет:

- 1) Низкогорье от 0 до 200 метров – 50,5 % ;
- 2) Возвышенности от 200 до 500 метров – 23,4%;
- 3) Нагорные плато от 500 м. до 1 км – 10,67%;
- 4) Низкогорье от 1 км до 2 км – 8,7% ;
- 5) Высокогорье свыше 2 км – 6,7 % от всей площади исследования.

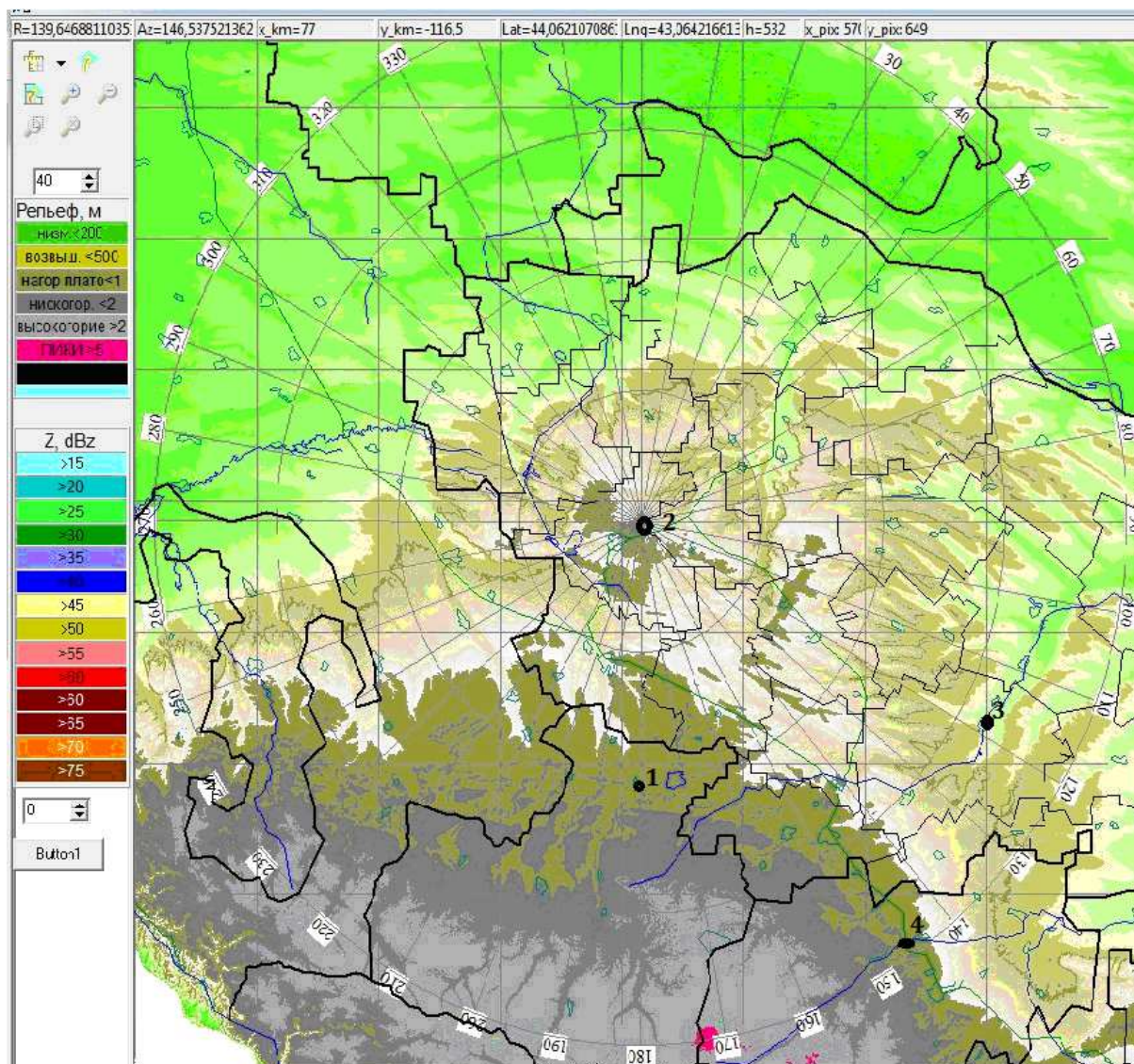


Рис. 4.21 Орография местности, на которой проводились исследования грозовой активности, где 1-4 грозорегистраторы

Количество разрядов типа «облако-облако», зафиксированных грозопеленгационной сетью, включающей в себя грозорегистраторы, расположенные в городах Михайловск, Зеленокумск, Черкесск и на полигоне Кызбурун, варьировалось от года к году. Так наиболее спокойными были 2009, 2010, 2015 и 2017 года (см. рис. 4.22). Слишком низкие показатели по количеству гроз на квадратный километр в 2009, 2017 гг. могут быть связаны со сбоями в работе грозопеленгационной сети. В целом прослеживается тенденция к увеличению количества гроз на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности.

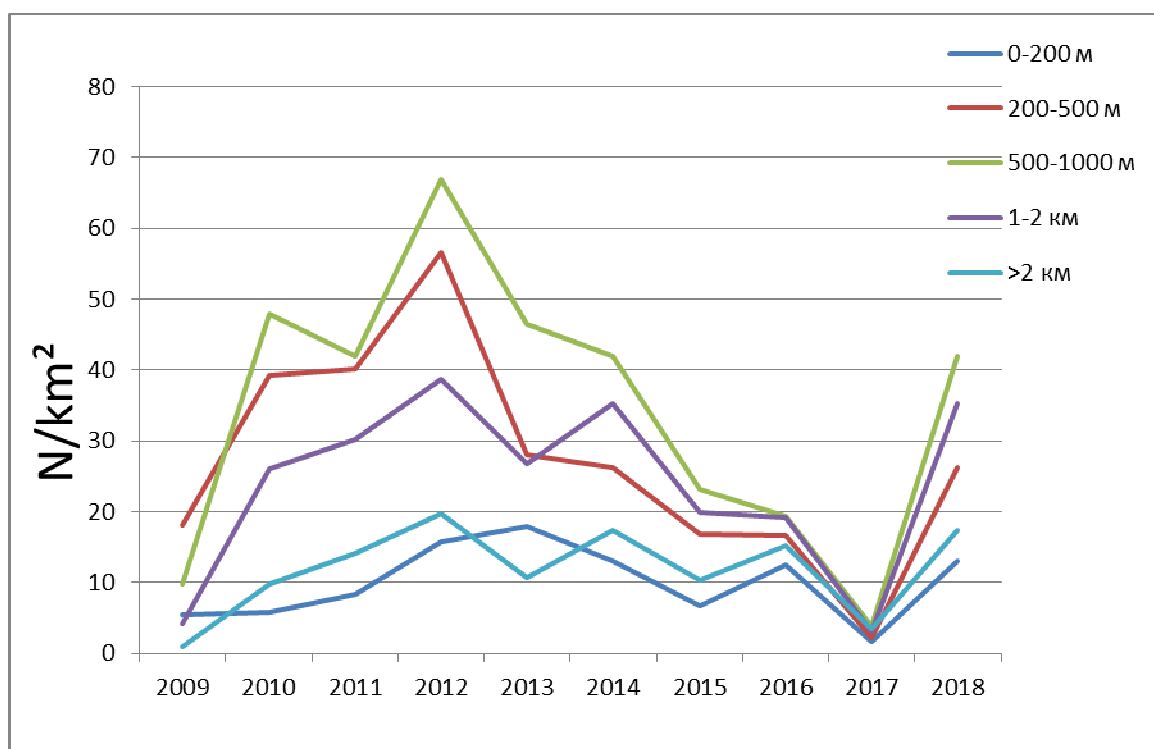


Рисунок 4.22 Количество молний «облако-облако» на квадратный километр за апрель-сентябрь в зависимости от высоты подстилающей поверхности по годам

Исследования влияния рельефа на распределение градовых процессов в регионе Кавказа проводимые в 90-х годах показали, что для предгорных и

горных районов Кавказа наибольшее число случаев грозоградовых процессов отмечается в районах с превышением 500 – 1000 метров над уровнем моря.

Статистический анализ грозовой активности в период с 2009 г. по 2018 г. в радиусе 208 км вокруг МРЛ (т.е. на площади = 173056 км<sup>2</sup>) показал (см. рис. 4.23), что грозы типа «облако-облако» чаще бывают в зонах, где высота рельефа варьируется от 500 м до 1 км, при этом количество молний образующихся над рельефом от 200 до 500 метров также имеет большую частоту повторяемости на квадрат площади.

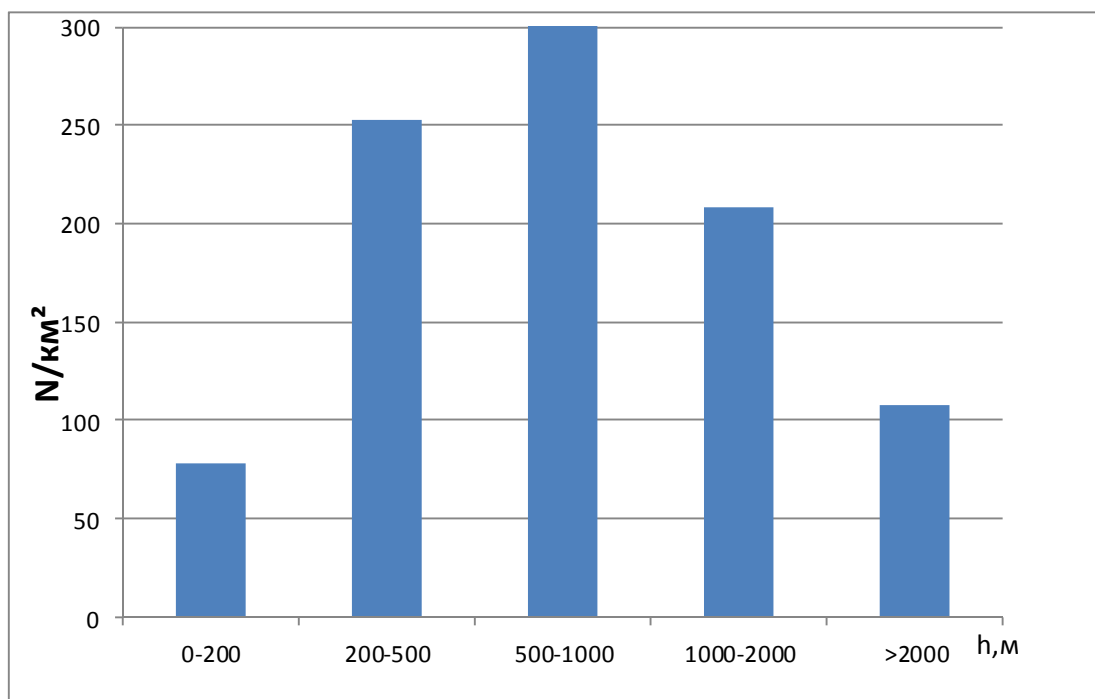


Рисунок 4.23 Количество молниевых разрядов типа «облако-облако» (VHF) на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности за период 2009-2018 гг.

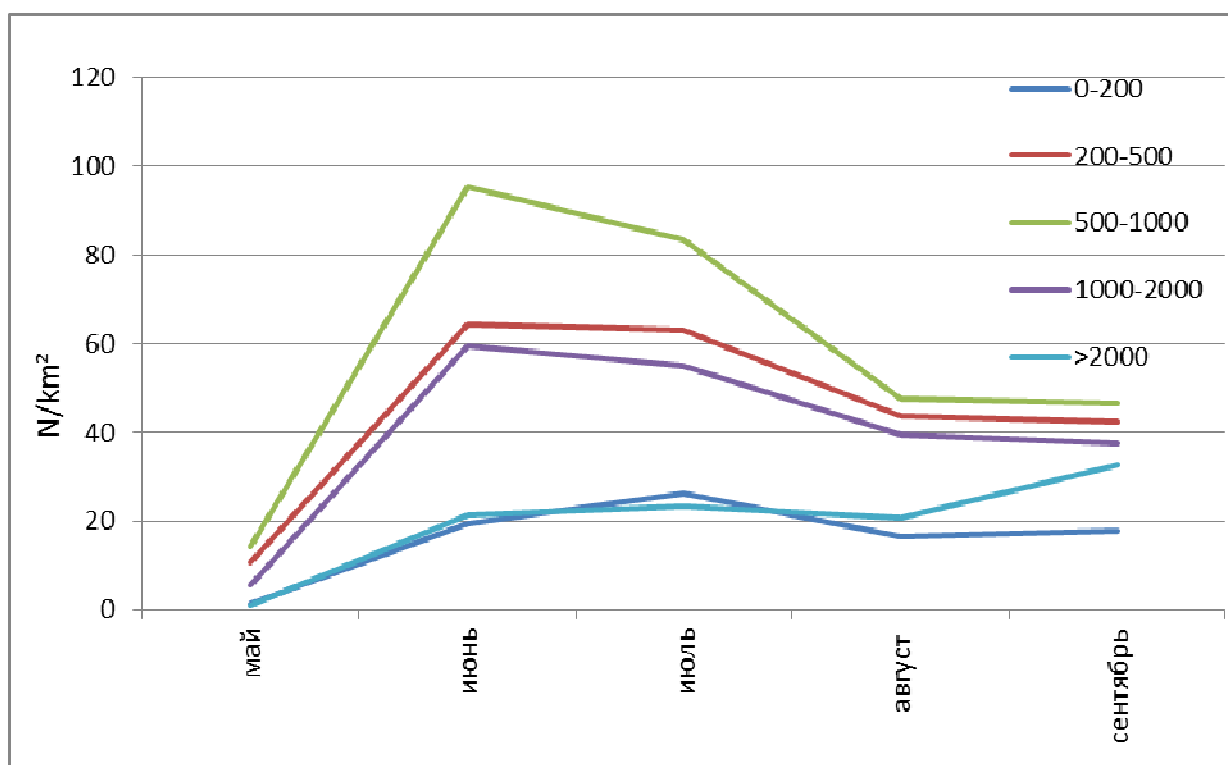


Рис.4.24 Суммарный месячный ход грозовой активности («облако-облако») за период с 2009 по 2018 гг. по месяцам

Суммарный ход грозовой активности за период 2009-2018 гг., представленный на рис. 4.24, показал, что наиболее грозоопасным месяцем является июнь, далее до сентября идёт снижение молниевой активности. Данная закономерность не распространяется на высокогорье (>2 км). Для высокогорья с мая по сентябрь наблюдается увеличение молниевой активности.

Высокая частота молниевой активности на сравнительно небольших высотах исследуемой области связана с тем, что на этой территории имеются высокогорные плато (Бермамыт, Шаджатмаз), которым присущи особенности долин и равнин, которые, в свою очередь, формируют горно-долинную циркуляцию. В сочетании с влажными воздушными массами, приходящими с запада, формируются благоприятные условия для развития грозовой активности [119].

#### 4.4.2 Статистический анализ характеристик молниевых разрядов «облако-земля» на территории Северного Кавказа и в Ставропольском крае

Также был проведен статистический анализ грозовой активности разрядов типа «облако-земля» в радиусе обзора МРЛ (г. Михайловск Ставропольского края) [129,130] .

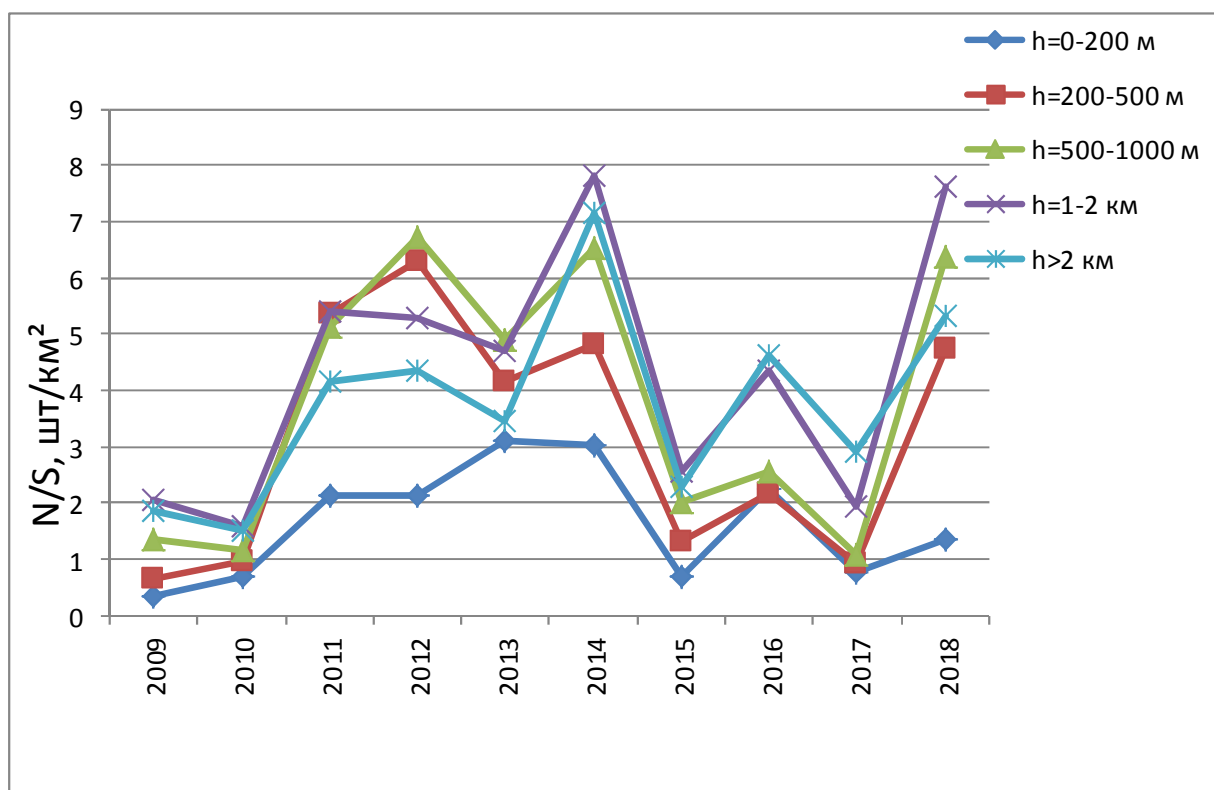


Рис. 4.25 Количество молний «облако-земля» на квадратный километр за апрель-сентябрь в зависимости от высоты подстилающей поверхности по годам

Из графика видно, что количество гроз типа «облако-земля», зафиксированных грозопеленгационной системой, включающей в себя грозопеленгаторы, расположенные в г. Ставрополе, г. Зеленокумске, на полигоне Кызбурун, и в г. Черкесске, варьировалось от года к году (см. рис. 4.25). Так наиболее спокойными были 2009, 2010, 2015 и 2017 годы. При этом прослеживается тенденция к увеличению количества гроз на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности.

Исследования влияния рельефа на распределение градовых процессов в регионе Кавказа, проводимые в 90-х годах [53,78,233], показали, что для предгорных и горных районов Кавказа наибольшее число случаев

грозоградовых процессов отмечается в районах с превышением 500-1000 метров над уровнем моря (см. рис. 4.26).

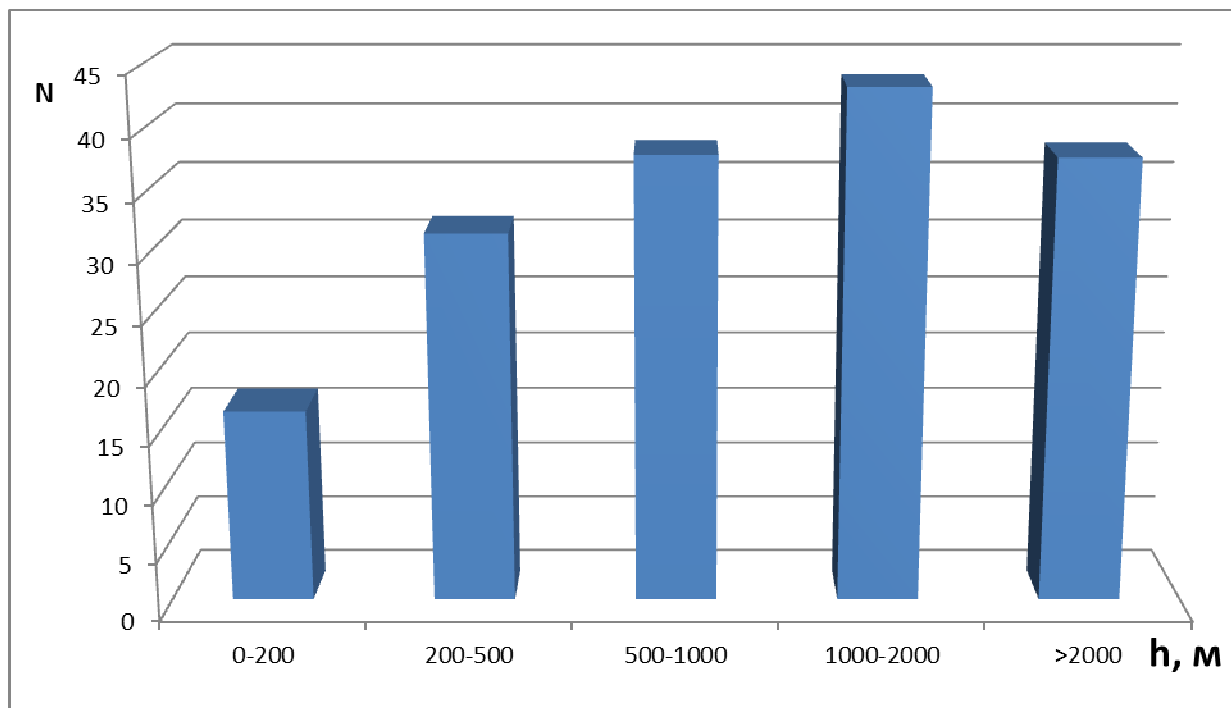


Рис. 4.26 Количество молниевых разрядов типа «облако-земля», на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности за период 2009-2018 гг.

Статистический анализ грозовой активности в период с 2009 по 2018 гг. в радиусе 208 км вокруг Ставропольского АМРК (т.е. на площади = 173055 км<sup>2</sup>) показал, что грозы типа «облако-земля» чаще бывают над участками с высотой земной поверхности от 1 до 2 км. При этом отмечалось 4395205 молниевых разряда, типа «облако-земля» из них 72% были отрицательными, а 28% положительными (см. рис. 4.27).

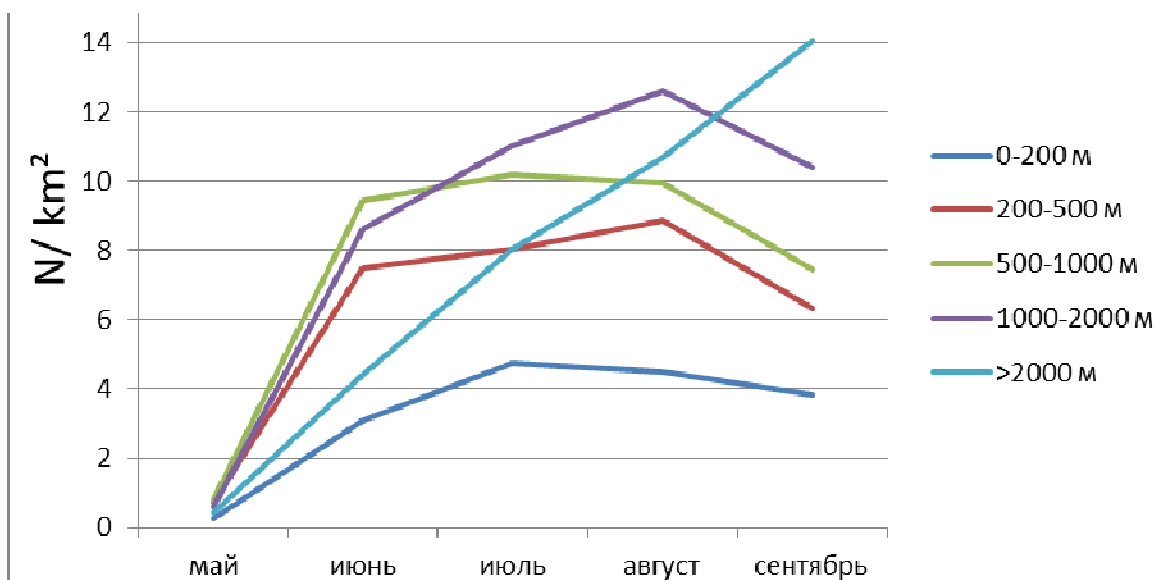


Рис. 4.27 Суммарный, месячный ход грозовой активности («облако-земля») за период с 2009 по 2018 гг. по месяцам

Среднемесячный ход грозовой активности за период 2009-2018 гг. показал, что наиболее грозоопасным месяцем является август (см. рис. 4.41). При этом среднемесячный ход грозовой активности для высокогорья сильно отличается от остальных данных. Для высокогорья наиболее грозоопасным месяцем является сентябрь. Данная закономерность может быть полезна для альпинистов.

#### 4.4.3 Статистический анализ значений токов в канале молний на территории Северного Кавказа

Проведенные исследования с помощью метода статистического анализа грозовой активности, максимальных значений токов в канале за 2009 – 2019 гг. показали, что максимальные значения положительных токов –  $I_{\max}^+$  на Северном Кавказе наблюдаются в июне (см. рис. 4.28-4.29). При этом максимальный ток, зафиксированный на исследуемой территории за 10 лет, равнялся 450 кА.

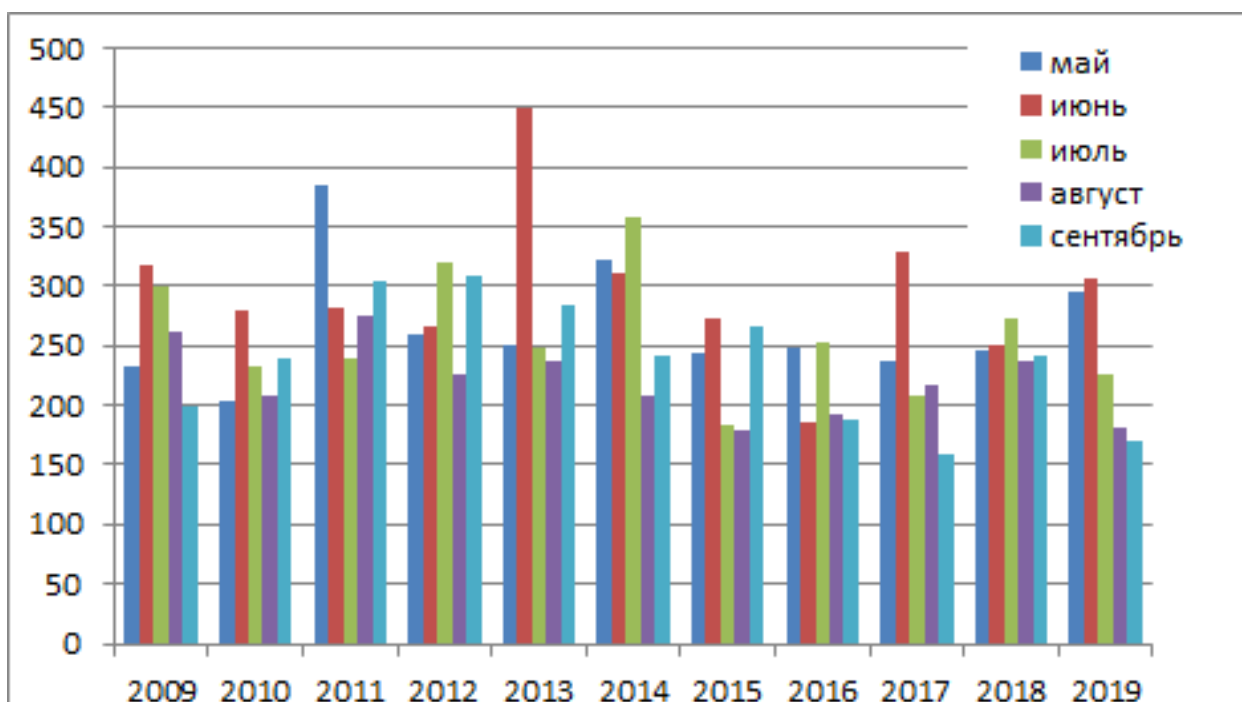


Рис. 4.28 Месячный ход максимальных значений положительных токов в канале молний за 2009-2019 гг. на Северном Кавказе

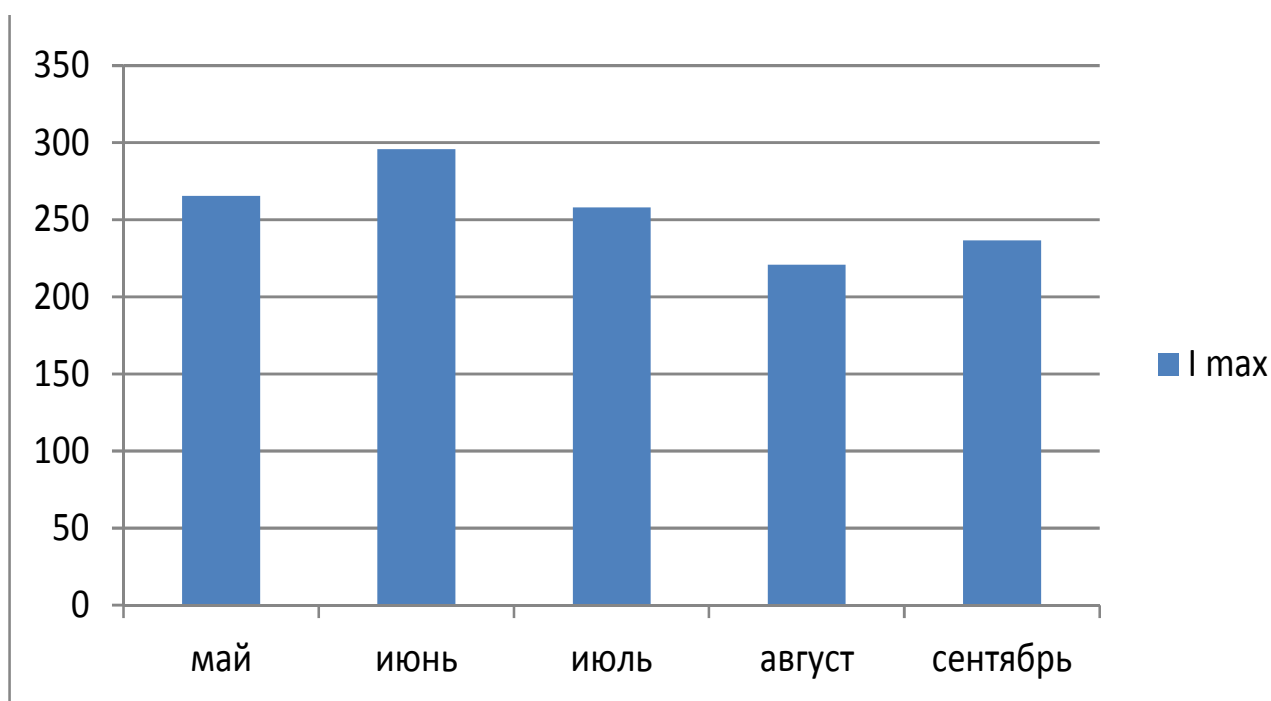


Рис. 4.29 Среднее максимальное значения положительных токов по месяцам в канале молнии за 2009-2019 гг. на Северном Кавказе

Для максимальных отрицательных значений токов в канале молнии наблюдается несколько иная закономерность (см. рис. 4.30-4.31). Наибольшее

отрицательное значение тока молний в канале наблюдалось в июле 2016 года и составляло -369 кА, при этом в среднем наибольшее значение токов наблюдалось в августе (см. рис. 4.31).

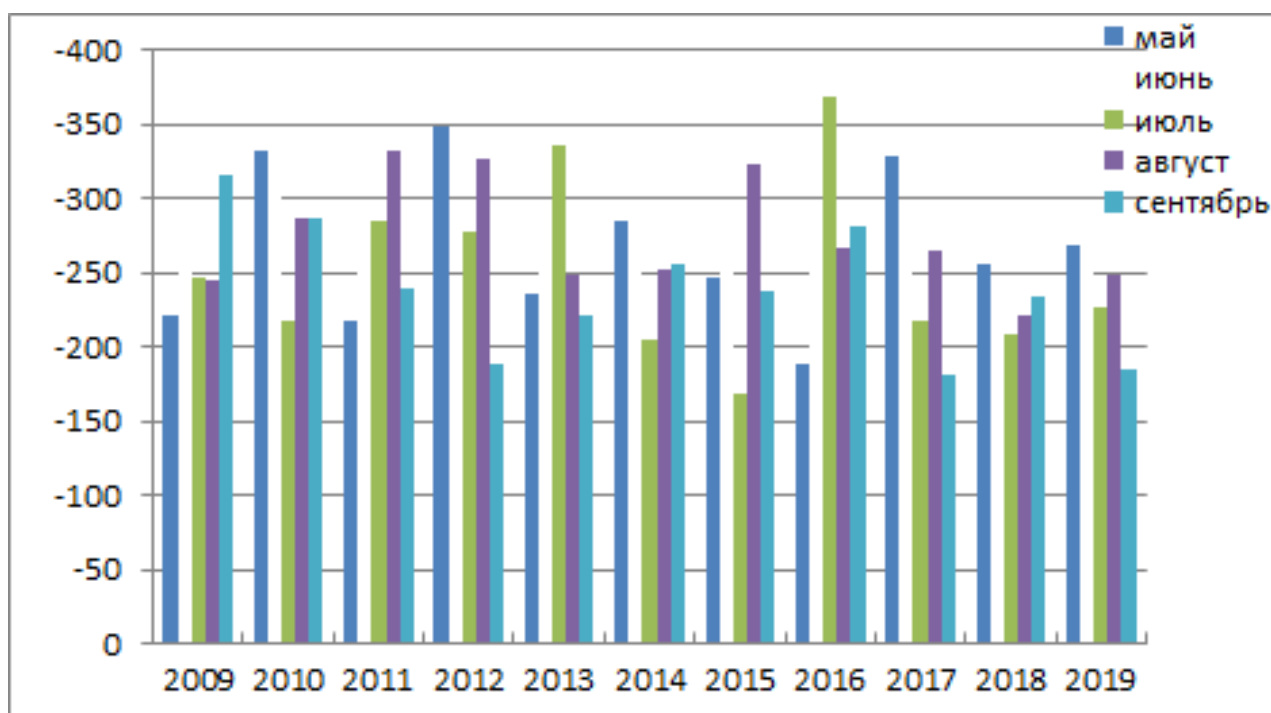


Рис.4.30 Месячный ход максимальных значений отрицательных токов в канале молний за 2009-2019 гг. на Северном Кавказе

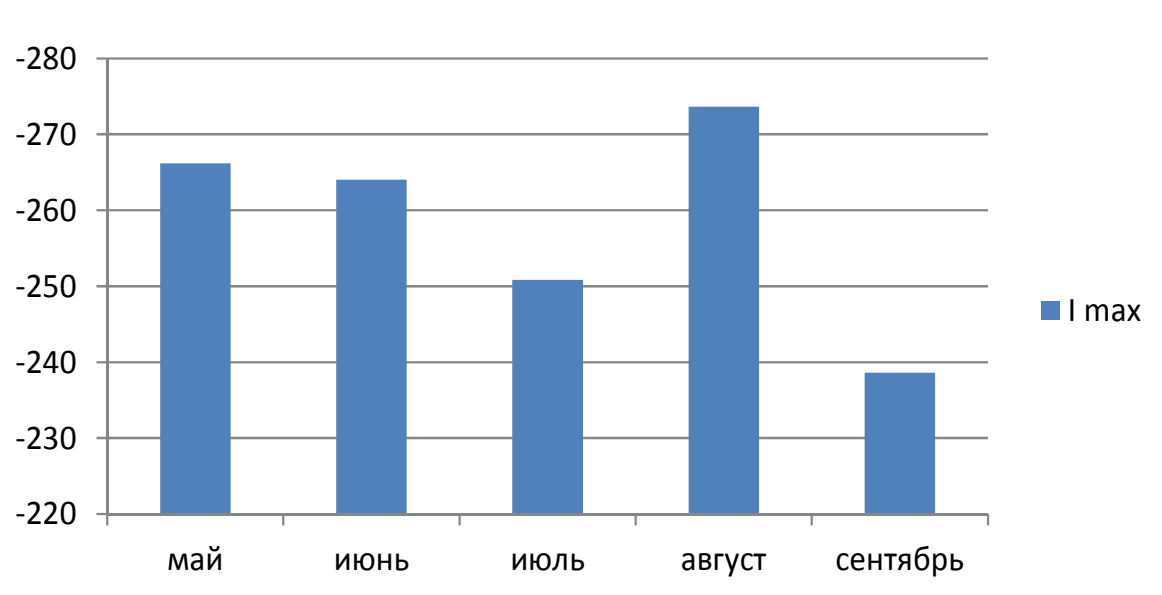


Рис. 4.31 Среднее максимальное значения отрицательных токов по месяцам в канале молнии за 2009-2019 гг. на Северном Кавказе

Распределение максимальных значений токов по карте рельефа представлено на рис. 4.32. На рисунке синими кружками обозначены максимальные значения токов, наблюдавшихся в мае, красными – в июне, зелеными – в июле, белыми – в августе и черными – в сентябре 2009-2019 гг. Из данного рисунка видно, что наибольшее количество пиковых значений токов в канале молнии наблюдалось в горных территориях и практически не фиксировалось на высотах от 500 до 2000 метров, при том что это наиболее грозоопасные участки исследуемых территорий (см рис.4.32).

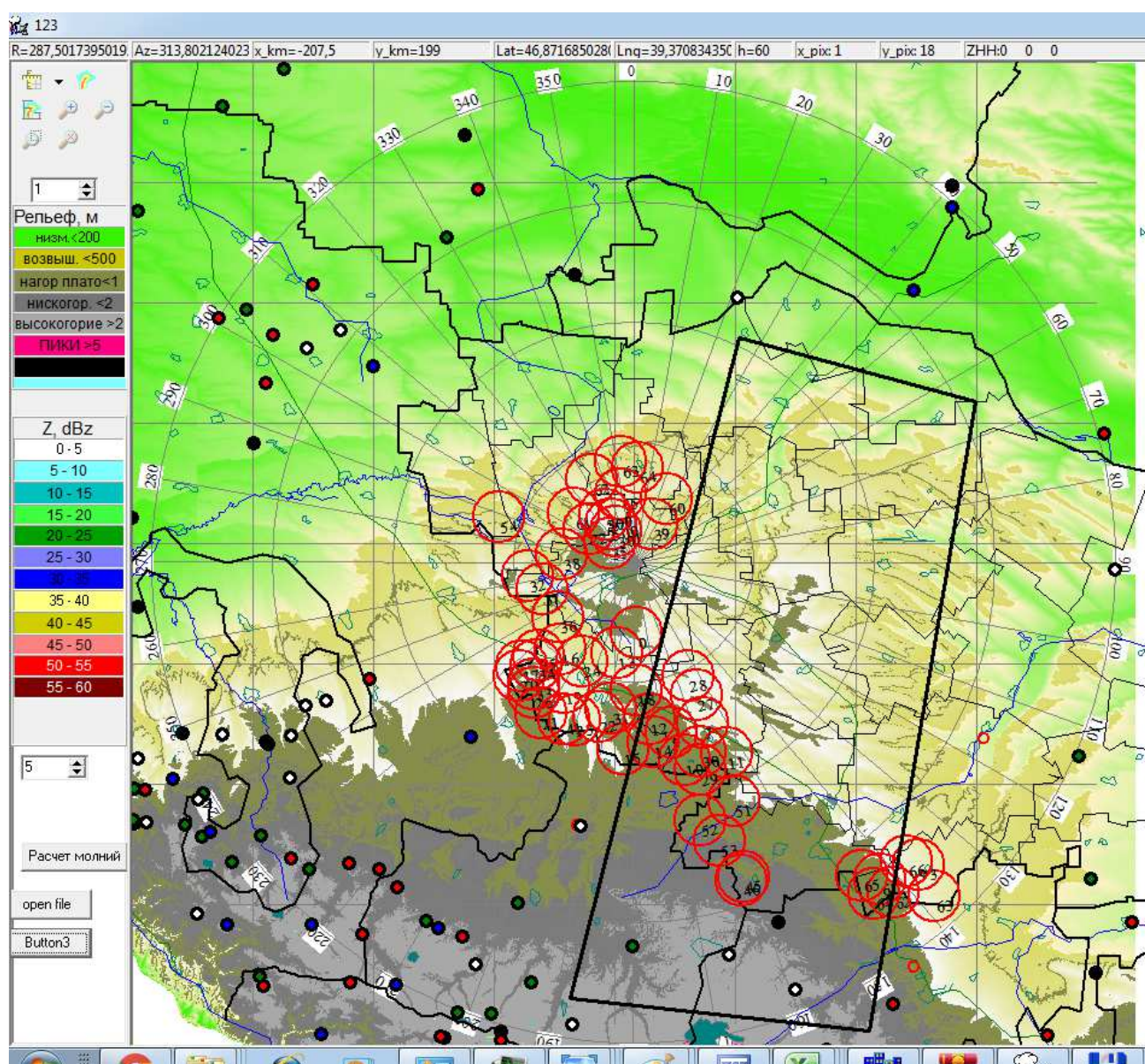


Рис.4.32 Распределение максимальных положительных и отрицательных зарядов в канале молнии, за 2009-2019 гг.

Распределение же отрицательных максимальных значений токов в канале разительно отличается от распределения максимальных положительных значений токов в канале (см. рис.4.33-4.34). Максимальные положительные токи распределялись равномерно по высокогорью и равнинам (см. рис. 4.34) в отличие от максимальных отрицательных значений токов, которые в подавляющем большинстве случаев фиксировались на высокогорье.

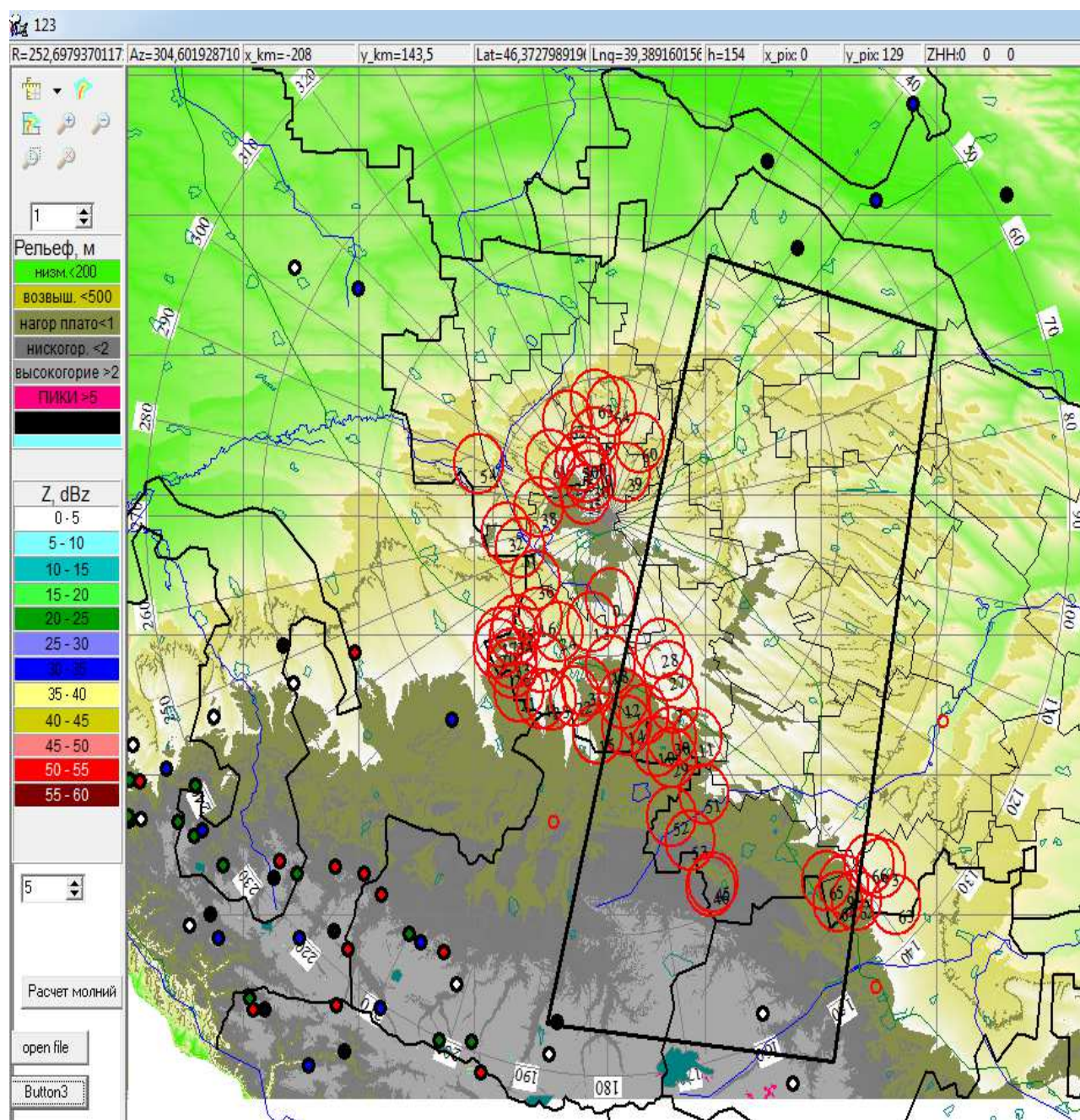


Рис. 4.33 Распределение максимальных отрицательных значений токов в канале на исследуемой территории за 2009-2019 гг.

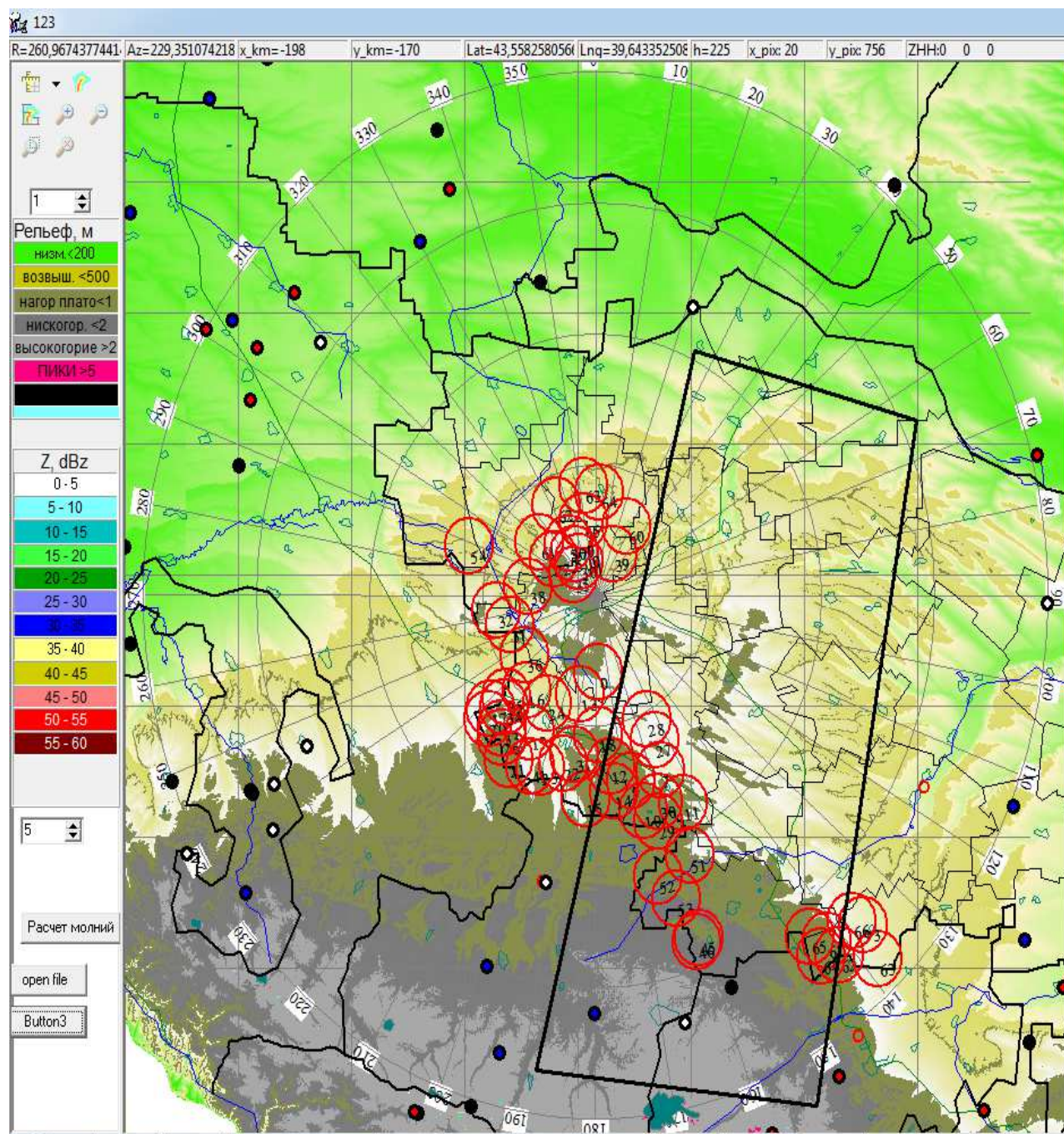


Рис. 4.34 Распределение максимальных положительных значений токов в канале на исследуемой территории за 2009-2019 гг.

В приложении 3, приводятся карты распределения гроз с 2009 по 2019 гг. На рисунках 4.35 и 4.36. представлена суммарная за 2009-2019 гг. карта распределения количества гроз по исследуемой территории для разрядов типа «облако-земля» и «облако-облако», соответственно. Из этих рисунков видно, что наблюдаются четкие очаги наибольшей грозовой активности. При этом наибольшее количество очагов зафиксировано на контрольной территории. Это может быть связано с тем, что место для грозорегистраторов выбиралось с

учетом покрытия территорий с наибольшей грозовой активностью, а может быть связано с тем, что репрезентативность и достоверность зафиксированных разрядов выше в зоне между четырьмя грозорегистраторами. Также было установлено, что информация о грозах практически не регистрируется в секторе от 355 до 5 градусов севернее грозорегистратора, расположенного в г Михайловск Ставропольского края.

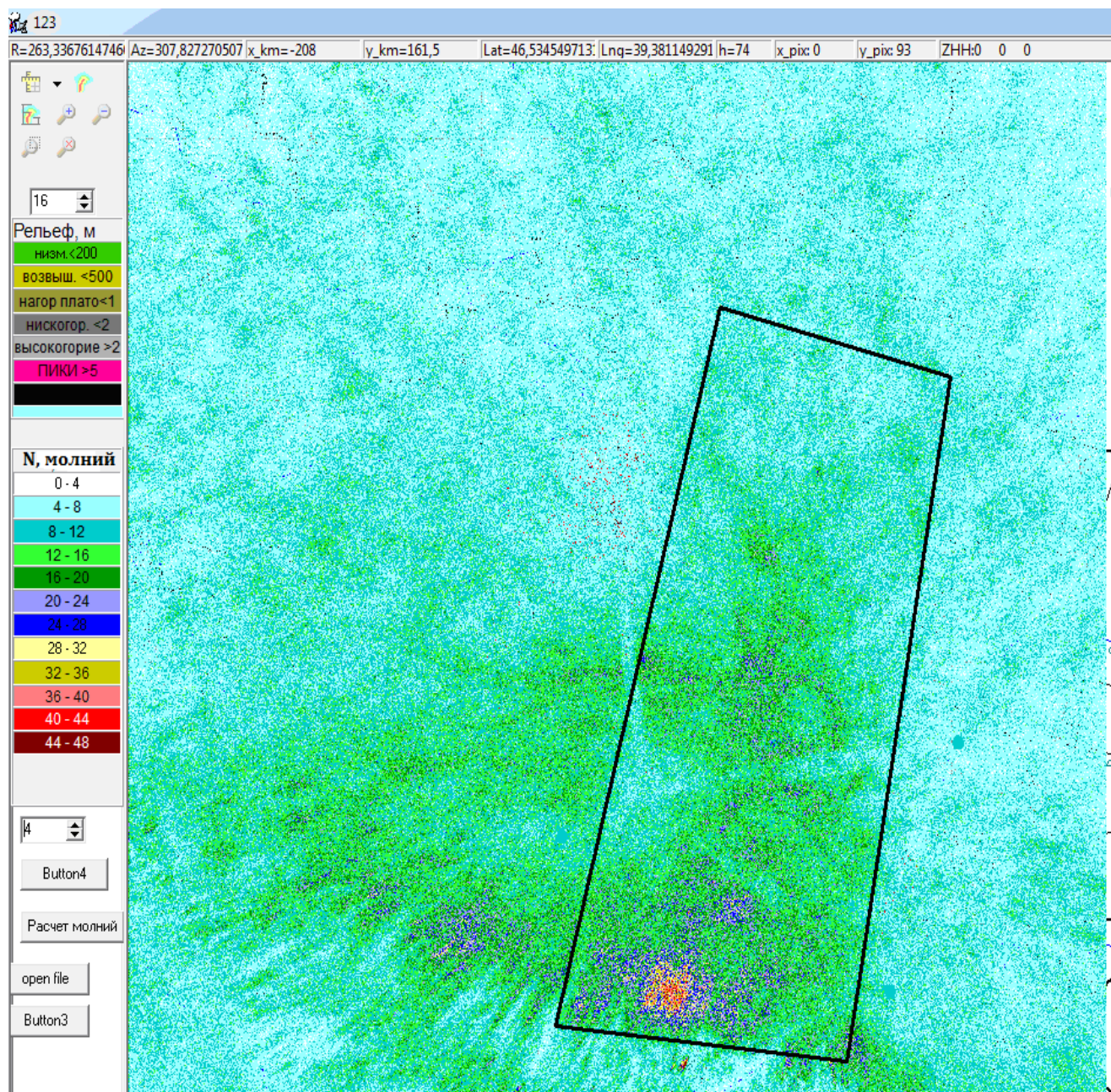


Рис. 4.35 Суммарное количество молний типа «облако-земля», зафиксированных на исследуемой территории, с 2009 по 2019 гг.

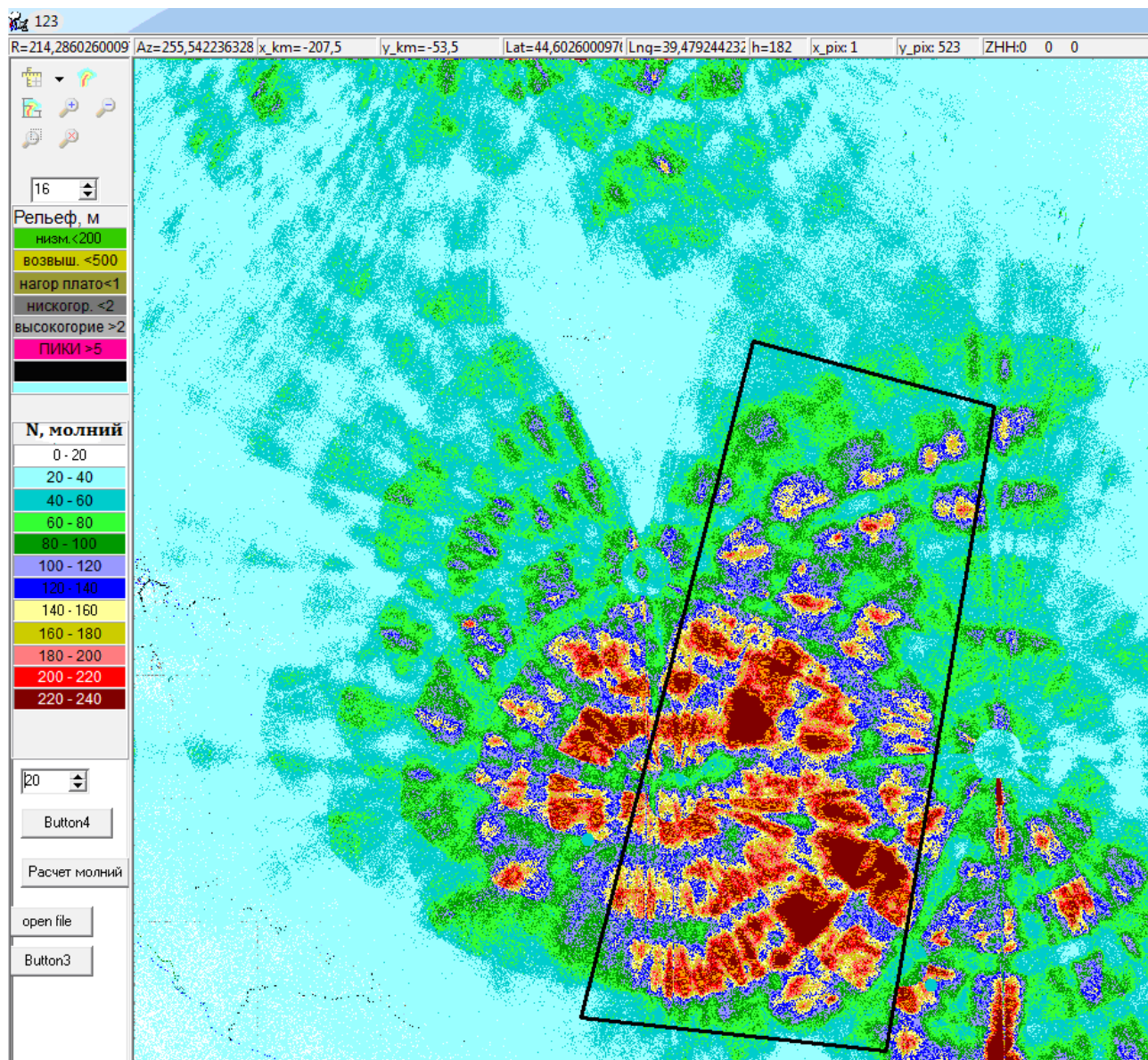


Рис. 4.36 Суммарное количество молний типа «облако-облако», зафиксированных на исследуемой территории, с 2009 по 2019 гг.

#### 4.5 Исследование мощных грозовых разрядов на территории Северного Кавказа

С использованием разработанных программ были проведены статистические исследования мощных грозовых разрядов на территории Северо-Кавказского региона [113,114,118,128]. В автоматическом режиме был проведен подсчет всех разрядов в зависимости от силы тока за весь период наблюдений, а также проведен подсчет разрядов с силой тока более 50 кА в зависимости от высоты подстилающей поверхности, над которой была

зафиксирована молния в 2018 г. Год выбирался по принципу свежести и наиболее стабильной работе грозопеленгационной сети.

Также анализировались данные по распределению значений токов молнии на исследуемой территории за 2009 – 2020 гг. Исследуемая территория представляет собой квадрат общей площадью 173056 км<sup>2</sup>. Всего на данной территории с 2009 по 2020 гг. было зафиксировано 1 575 628 положительных и 3 967 646 отрицательных разряда. Исследования, проводимые на более обширной территории за 2009-2015 гг., дали соотношение доли положительных и отрицательных разрядов 23% и 77% соответственно [317]. Процент зафиксированных разрядов за 2009 – 2020 гг. на исследуемой территории отрицательной полярности составляет 71,6%, положительной полярности – 28,4 %. Так как в данной работе был охвачен более значительный период времени и больший объем информации, новые данные, полученные в данной работе, можно считать уточнением полученных ранее.

На распределение токов молний по всей территории охвата грозопеленгационной сети, составляющей 1200000 км, в период с 2009 по 2015 гг. видно, что максимальное количество зафиксированных разрядов имеют значение токов от 10 до 14 кА, как для положительной так и для отрицательной полярности [129].

Для исследуемой в работе территории данное распределение несколько отличается. Так по данным графика распределения положительных разрядов видно, что наибольшее количество зафиксированных положительных и отрицательных разрядов имеют значения от 5 до 10 кА, с пиками в 7 кА (рис.4.37, рис. 4.38). При этом график распределения отрицательных разрядов имеет более пологий вид (рис.3).

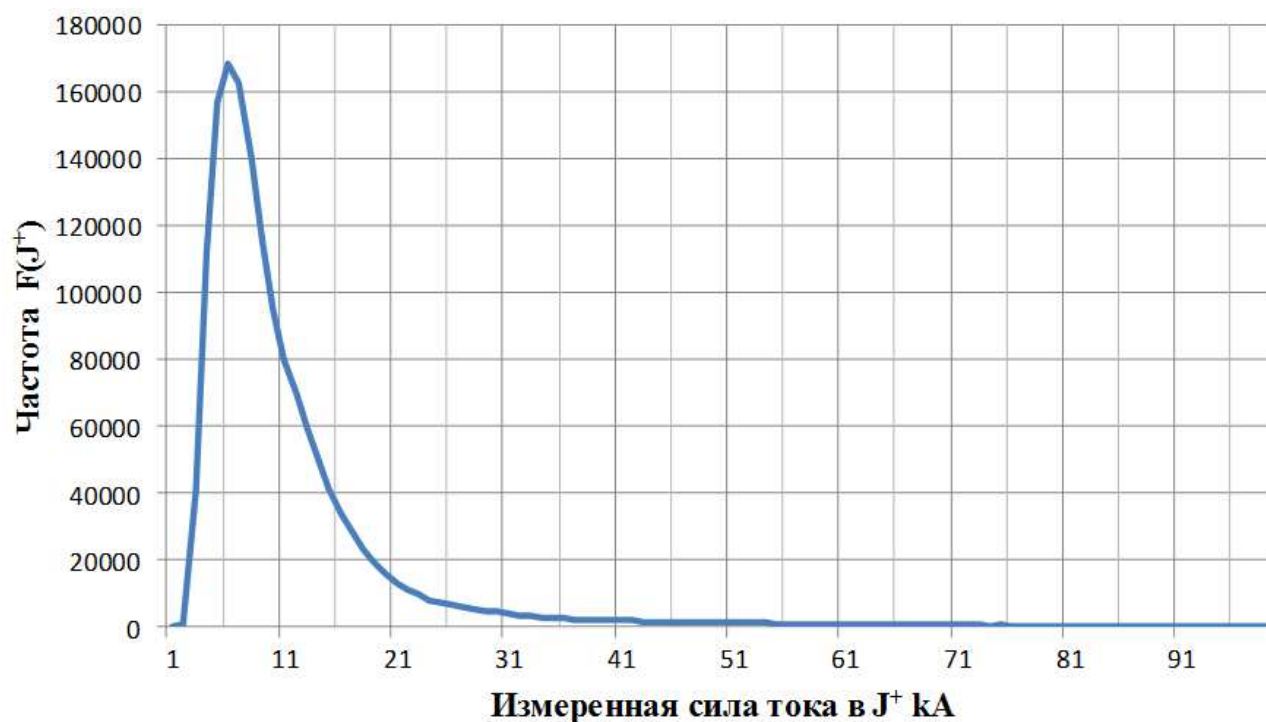


Рис. 4.37 Распределение значений положительных токов (в кА) молнии на исследуемой территории за 2009-2020 г.

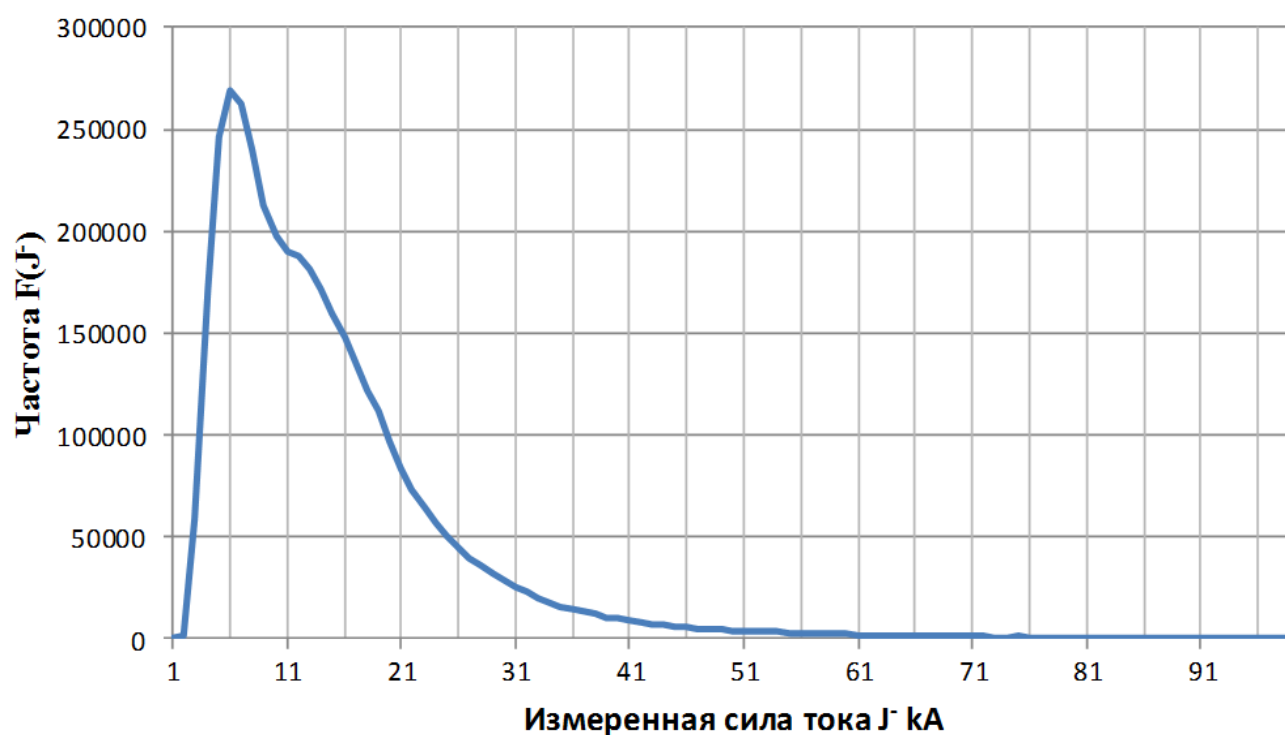


Рис. 4.38 Распределение значений отрицательных токов (в кА) молнии на исследуемой территории за 2009 – 2020 гг.

На исследуемой территории за 2018 г. было зафиксировано 5214 с силой тока от 50 до 100 кА и 582 с силой тока более 100 кА разрядов отрицательной

полярности, а также 2376 разрядов с силой тока от 50 до 100 кА и 667 разрядов с силой тока более 100 кА. Процент зафиксированных разрядов с силой тока от 50 до 100 кА для отрицательной полярности составляет 68,7% для положительной полярности – 31,3 %. Примечательно, что несмотря на то, что количество зафиксированных отрицательных в 2 раза выше, чем положительных разрядов, количество разрядов для значений более 100 кА практически идентичны для обеих полярностей.

Также было установлено, что пиковые значения разрядов молний в большинстве случаев фиксировались в дни с активными градовыми процессами и над не самыми мощными облаками (рис. 4.39). На рисунке крестиками обозначены разряды, наложенные на карту максимальной радиолокационной отражаемости, при этом, чем больше по размерам крестик, тем сильнее разряд. Из рисунка видно, что там, где имеют места интенсивные процессы, разряды имеют стабильно невысокие значения токов. Значение в 252 кА было зафиксировано над развивающимся, а не зрелым градовым облаком.

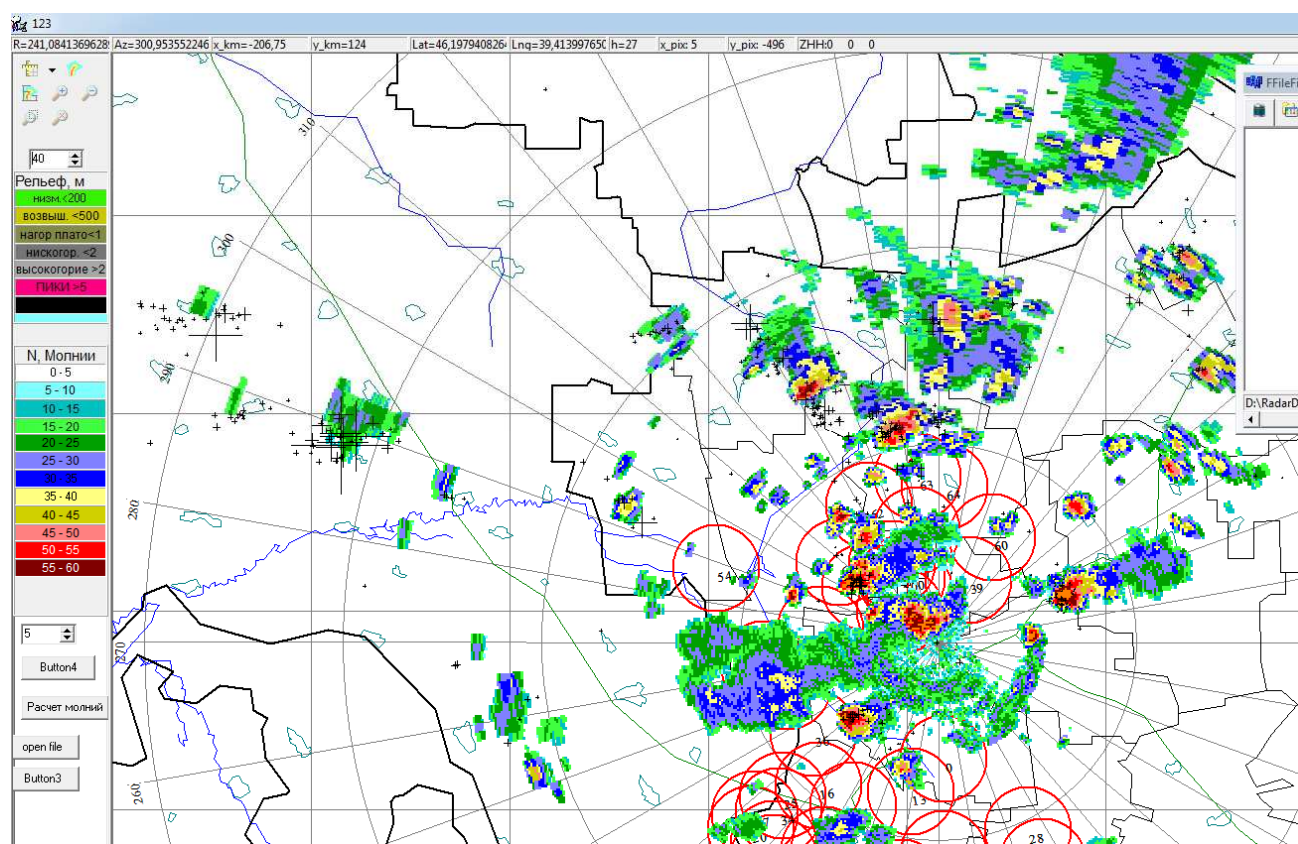


Рис. 4.39 Карта радиолокационной информации с наложенными на нее грозопеленгационными данными

В рамках данной работы было проанализировано 2376 положительных и 5214 отрицательных разряда от 50 до 100 кА, а также 667 положительных и 582 отрицательных разряда с силами токов свыше 100 кА.

Предварительно посчитав площади рельефов, было установлено, что на исследуемой территории высоты:

1. от 0 до 200 м, составляют  $87420 \text{ км}^2$ ;
2. от 200 до 500 м, составляют  $40484 \text{ км}^2$ ;
3. от 500 м до 1 км, составляют  $18477 \text{ км}^2$ ;
4. от 1 до 2 км, составляют  $15083 \text{ км}^2$ ;
5. более 2 км, составляют  $11590 \text{ км}^2$ .

Анализ распределения токов в зависимости от высоты подстилающей поверхности для разрядов от -50 до -100 кА показал, что наибольшее количество разрядов зафиксировано над высотами от 1 до 2 км (рис. 4.40а). Интенсивность мощных разрядов на высокогорье с высотами подстилающей поверхности более 2 км как для разрядов от -50 до -100 кА, так и для разрядов свыше -100 кА, уступает по количеству разрядам, зафиксированным над высотами от 1 до 2 км. Наибольшее количество мощных разрядов отрицательной полярности зафиксировано в июне (рис. 4.40 а, б).

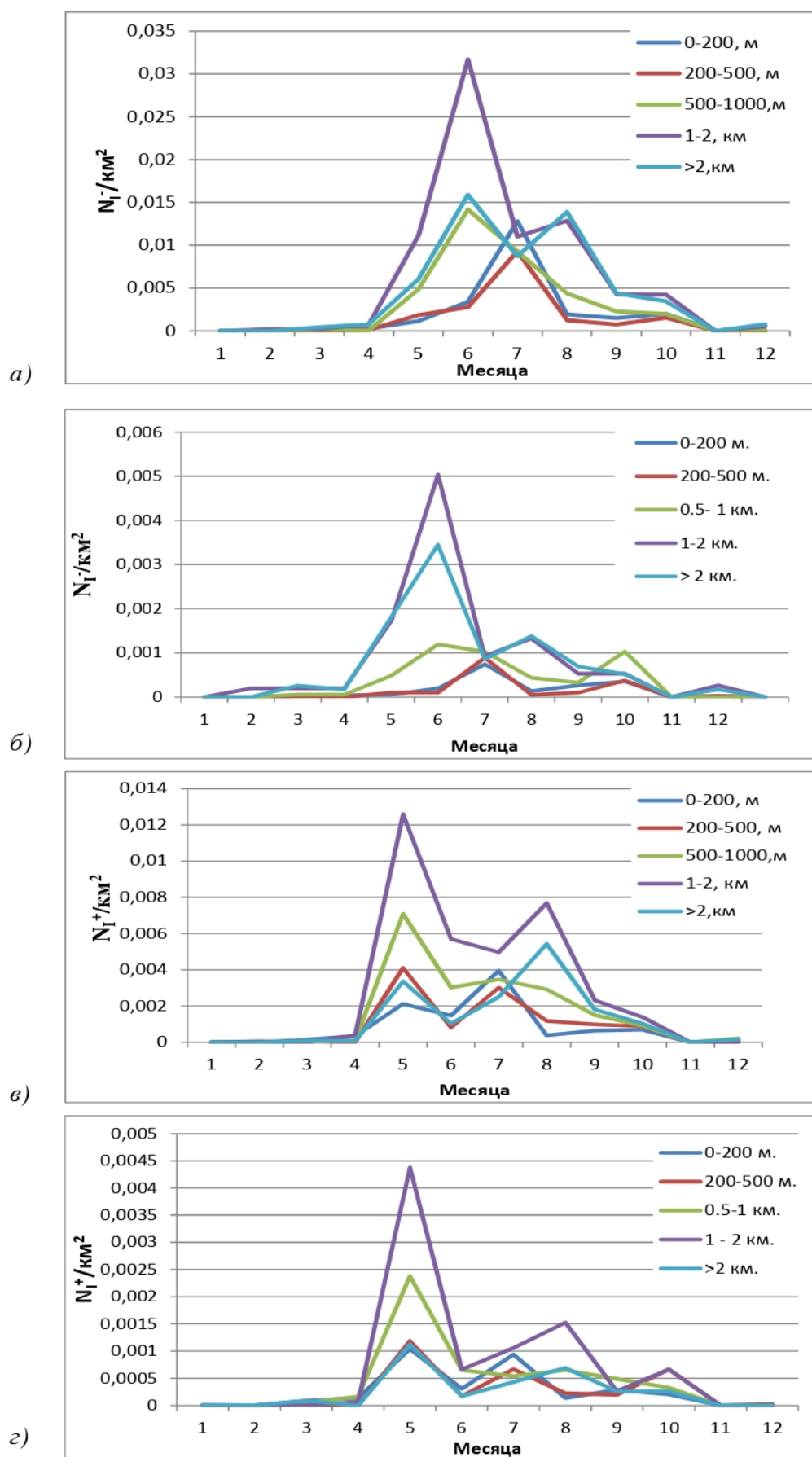


Рис. 4.40 Количество разрядов на квадратный километр с силой тока: а) от -50 до -100 кА, б) выше -100 кА, в) от 50 до 100 кА, г) свыше 100 кА

Для разрядов с положительной полярностью характерно несколько иное распределение разрядов на исследуемой территории. Как для положительной полярности, так и для отрицательной полярности наибольшее количество мощных разрядов было зафиксировано над высотами от 1 до 2 км. Но для положительных разрядов характерно значительно меньшее количество разрядов, зафиксированных над высокогорьем, по сравнению с разрядами, зафиксированными над высотами от 0,5 до 1 км. Также необходимо отметить, что наибольшее количество мощных разрядов положительной полярности, были зафиксированы в мае (рис. 4.40 в, г). В июне количество положительных разрядов от 50 до 100 кА не сильно упало по сравнению с маем, но для разрядов свыше 100 кА падение интенсивности зафиксированных разрядов более заметно.

## ВЫВОДЫ

Применение метода автоматической идентификации облаков обеспечило возможность обработки и анализа огромного массива данных радиолокационных наблюдений облаков и осадков на Северном Кавказе, включающего 125186 циклов обзора, получить повторяемости значений параметров 703726 КЯ в более чем 324 миллиардах 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. По данным анализа радиолокационных наблюдений облаков и осадков на примере двух регионов (Северный Кавказ и Республика Крым) получены следующие основные результаты:

1. Впервые на обширном экспериментальном материале получены подробные статистические данные о повторяемости КЯ с ливневыми и

градовыми осадками различной интенсивности, а также их региональный, многолетний, годовой и суточный ход. Установлены сезонная и почасовая повторяемости опасных КЯ в любом заданном году и в целом за все годы наблюдений.

2. Детально изучены многолетний, годовой и суточный ход градоопасности двух регионов, установлены наиболее градоопасные периоды года и суток, выявлены региональные особенности в повторяемости КЯ со слабым, умеренным и интенсивным градом, получены соотношения повторяемости градовых процессов разной интенсивности.

3. Исследована взаимосвязь периодов развития градовых процессов с температурой, влагосодержанием атмосферы, аэросиноптическими условиями, солнечной активностью, показано, что четкой связи градоопасности и солнечной активности не наблюдается.

4. Получены обширные статистические данные о частоте пространственных точек с градовой, грозовой и ливневой опасностью, характеризующими вероятность встречи с крупным, средним и слабым градом, представляющие интерес для целей обеспечения безопасности полетов авиации.

5. Показана возможность автоматического получения карт явлений погоды с указанием векторов направления и скорости перемещения КЯ и ведущего потока.

6. Полученные результаты могут представлять интерес для оперативной практики активных воздействий на градовые процессы, штормооповещения и метеообеспечения авиации.

7. Исследования грозовой активности на территории Северного Кавказа показали, что в среднем больше всего гроз типа «облако-облако» встречается на высотах от 500 до 1000 м, при этом пик молниевой активности молний, образующихся над любым рельефом помимо высокогорья, приходится на июнь. Для высокогорья же наблюдалось увеличение количества гроз на квадратный километр с мая по сентябрь.

8. Исследования грозовой активности на Северном Кавказе также выявили, что в среднем больше всего гроз типа «облако-земля» встречается на высотах от 1000 до 2000 м, при этом была обнаружена тенденция к линейному увеличению количества гроз с мая по сентябрь для высокогорья.

9. Детально изученные многолетние данные молниевой активности позволили выявить очаги грозовой активности, а также слепые зоны грозорегистрационной сети.

10. Исследования также позволили определить распределение максимальных значений токов в каналах разрядов в зависимости от рельефа местности и выявить все основные закономерности.

11. Статистический анализ грозовой активности на исследуемой территории площадью 173056 км<sup>2</sup>, за 2009-2020 гг. показал, что максимальное количество разрядов, зафиксированных на всей исследуемой территории как для положительной так и для отрицательной полярности, равны 7 кА, при этом для отрицательной полярности характерен более пологий вид графика распределения значений токов. Доля отрицательных и положительных в общем количестве наземных разрядов на исследуемой территории за 2009-2020 гг. составляет 71, 6% и 28, 4% соответственно.

12. Наибольшее количество мощных грозовых разрядов отрицательной полярности фиксировалось в июне над высотами от 1 до 2 км, положительной полярности в мае также на высоте от 1 до 2 км. Также необходимо отметить, что мощные грозы положительной полярности чаще встречаются над высотами от 0.5 до 1 км, чем над высокогорьями, а для отрицательной полярности, наоборот, грозы чаще встречаются над высокогорьями, чем над нагорными плато.

## Глава 5

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ И ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ

## 5.1 Перспективы комплексного применения радиолокационной, грозопеленгационной, спутниковой и наземной информации метеостанций и постов

Радиолокационные, грозопеленгационные, спутниковые и наземные данные метеостанций и постов являются основными источниками метеорологической информации. Однородность этих источников информации важна для правильной интерпретации и оценки метеорологической информации. Одними из самых неоднородных источников информации являются данные метеостанций, плувиографов и осадкомеров [161,171,183]. Длительные детальные исследования погрешностей осадкомерных приборов [59-62,227,228], показали, что осадкомеры вносят систематические ошибки, нарушающие однородность данных [74,75,77,96]. Для восстановления климатической однородности измеренных осадков приходится проводить всевозможные математические манипуляции. Под восстановлением климатологической однородности подразумевается исключение влияния несовершенства и изменение методик измерений, типов сетевых приборов, изменений сроков наблюдений, а также изменение во времени условий наблюдений [95].

Количество осадков на наблюдательной метеорологической сети Российской Федерации с середины 1950-х годов определяется с помощью осадкомера Третьякова, до этого стандартным сетевым прибором являлся дождемер с защитой Нифера. Оба этих осадкомерных прибора обладают систематическими погрешностями, вызванными аэродинамическими свойствами приборов, процессами испарения, конденсации и смачивания

Эмпирический анализ данных об изменении климата основывается на результатах непосредственных приземных наблюдений за метеорологическими величинами [151,174,242].

Точность измерения жидких осадков играет важную роль для оценки многих гидрометеорологических параметров. В последнее время, с развитием сети штормооповещения возникла острая необходимость приведения всей гидрометеорологической информации как радиолокационной, так и наземной к единому формату данных [124].

По данным комиссии ВМО по приборам и методам наблюдений (СИМО), сегодня в мире установлено более 45 тыс. осадкомеров, из них большинство составляют датчики поплавкового (рис.5.1) и челночного типов (рис. 5.2). На долю остальных датчиков приходится порядка 5 процентов [208,310,311] .

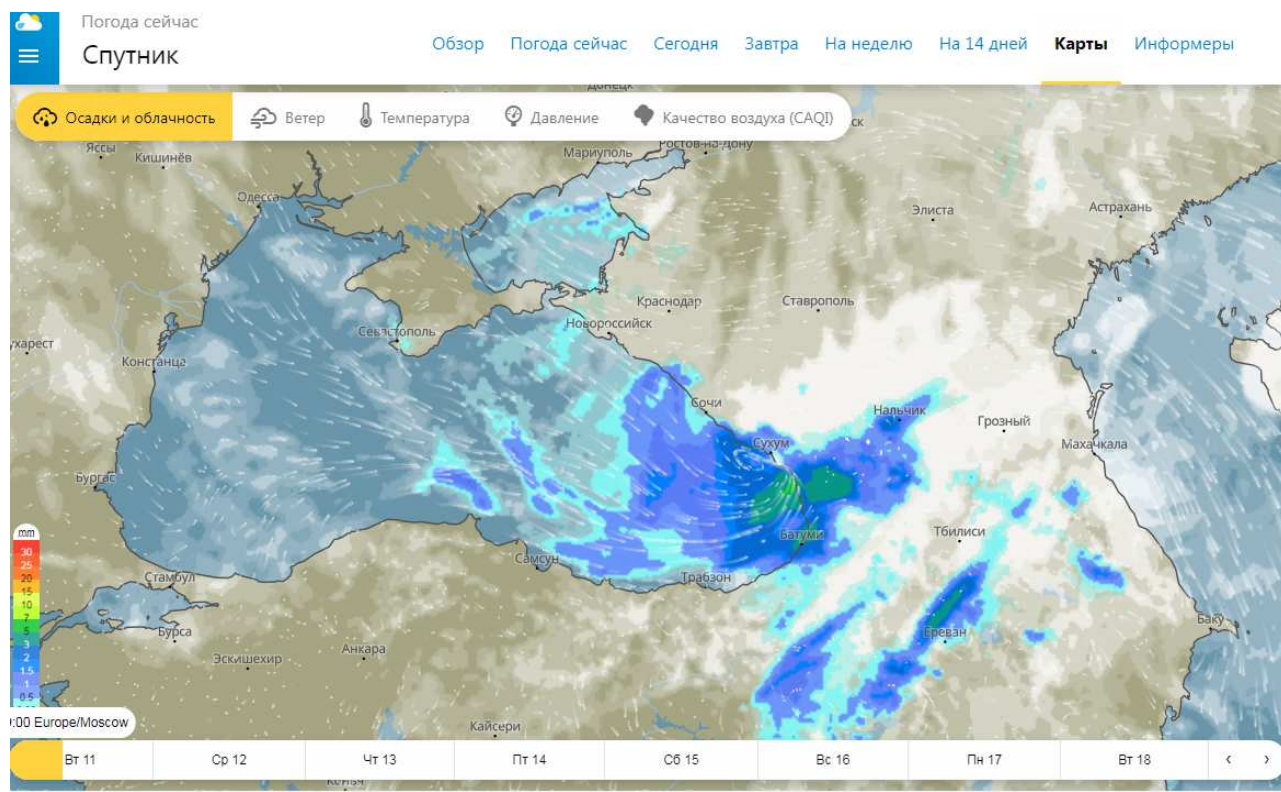
В России информацию об осадках получают в основном из сети плювиографов поплавкового типа П-2 [208]. За рубежом для измерения количества осадков используют в основном осадкомеры челночного типа.

У всех этих датчиков есть существенные недостатки, заключающиеся в ограниченности размера водосборника. Основным фактором, влияющим на точность измерения осадков, является деформация ветрового поля приемным отверстием осадкомера [208]. Для повышения однородности и сопоставимости радиолокационной и наземной информации, необходимо увеличить площадь осадкоприемника и тем самым сократить влияние деформации ветрового поля. За счет усреднения по площади водосборника, наземные данные об осадках лучше коррелируют с радиолокационной информацией [104].

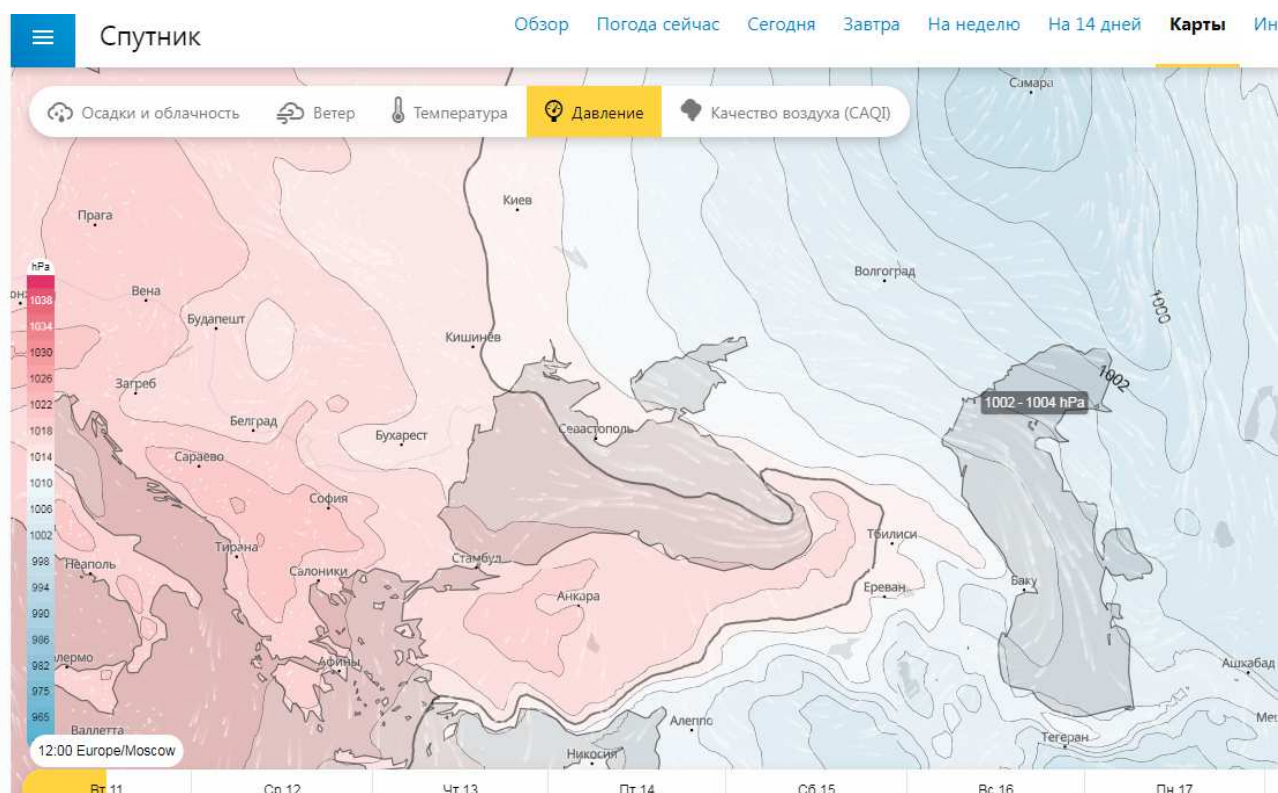
## **5.2 Перспективы применения спутниковой информации**

По данным наблюдений сети метеостанций, которая во многих районах является очень редкой, не все осадки регистрируются, особенно, если они обладают малой продолжительностью существования и малой скоростью

движения[232].



а)



б)

Рис. 5.1 Спутниковая информация о: а) количестве осадков, б) распределении давления по южному федеральному округу за 11.07.2023 г.

Современная метеорადиолокационная сеть несмотря на развитие, все же не обеспечивает полное покрытие всей территории России, а тем более земного шара. Поэтому одним из дополнительных источников информации об облачном покрове регионального покрытия могут являться спутниковые данные.

Комбинированное использование радиолокационной и спутниковой информации о количестве осадков (рис. 5.1 а), а также температурном режиме или барических карт (рис. 5.1 б), прилегающих к защищаемым от града территориям,

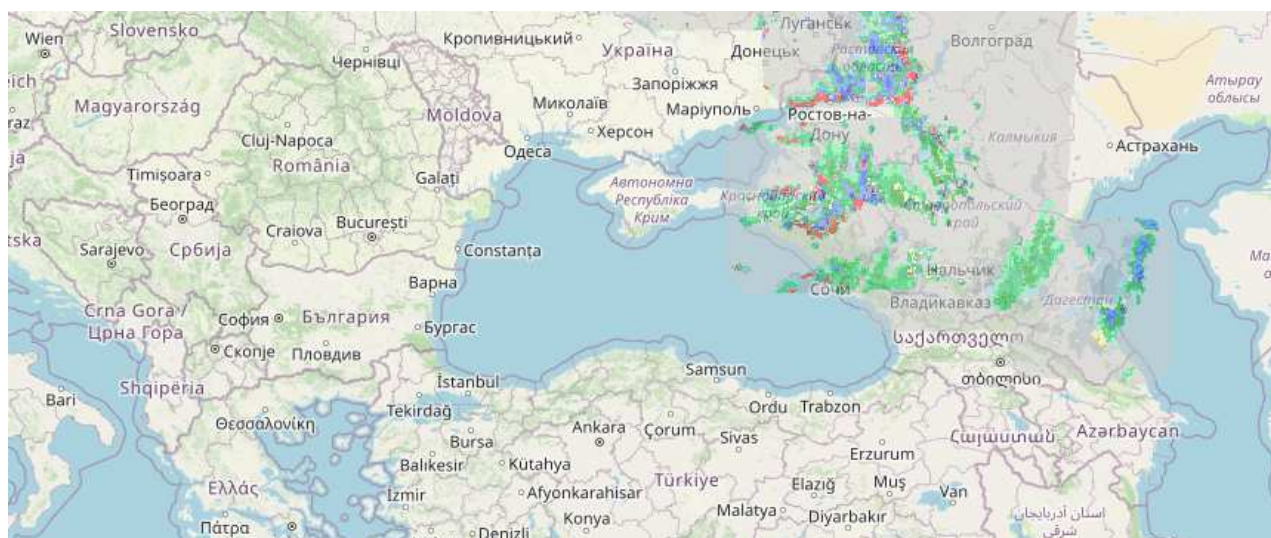


Рис. 5.2 Комплексная радиолокационная карта опасных явлений погоды 07.11.2023 15:00 (МСК)

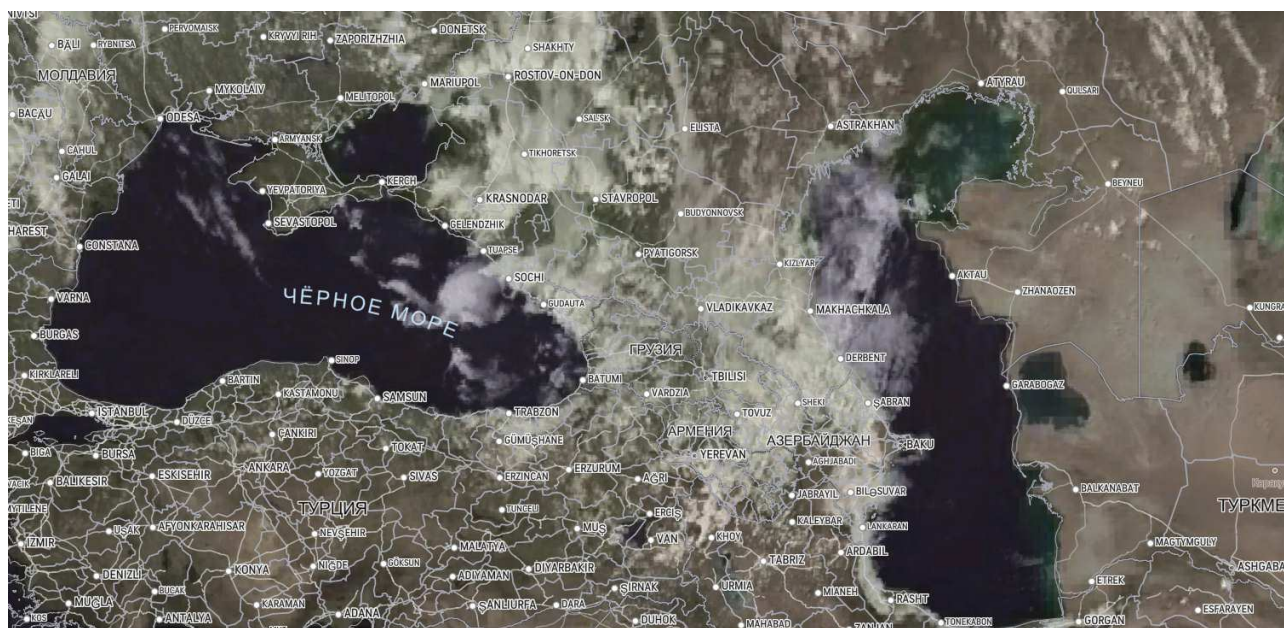


Рис. 5.3. Спутниковая карта RealVue Юга России 07.11.2023 15:00 (МСК)

позволят повысить информативность и дополнят радиолокационную карту опасных явлений погоды (рис. 5.2), что в свою очередь повысит возможность прогнозирования развития грозоградовых процессов и позволит своевременно принять решение о необходимости 1-й или 2-й категории воздействия на развивающиеся КЯ.

Также в последнее время становятся все актуальнее технологии искусственного интеллекта. Распознавание спутниковых данных в реальном времени (рис.5.3) и сопоставление этих данных с радиолокационной отражаемостью могут позволить рассчитывать по спутниковым данным интенсивность развития грозо-градовых процессов в областях не покрытых радиолокационной сетью.

### **5.3 Развитие и модернизация наземной информации об осадках для калибровки данных МРЛ**

Для повышения сопоставимости радиолокационной и наземной информации метеостанций о количестве осадков предлагается новый тип плювиографа – *плювиограф кровельного типа* [104,186]. Принцип работы плювиографа представлен на рис 5.4, он состоит в том, что кровля может быть использована как площадка сбора осадков. Для этого необходимо рассчитать площадь проекции кровли на плоскость и добавить площадь сточных желобов. Сток с площади сбора должен быть организован в одном месте. Подсчитав количество осадков и разделив на площадь сбора, можно рассчитать количество осадков в единице объема.

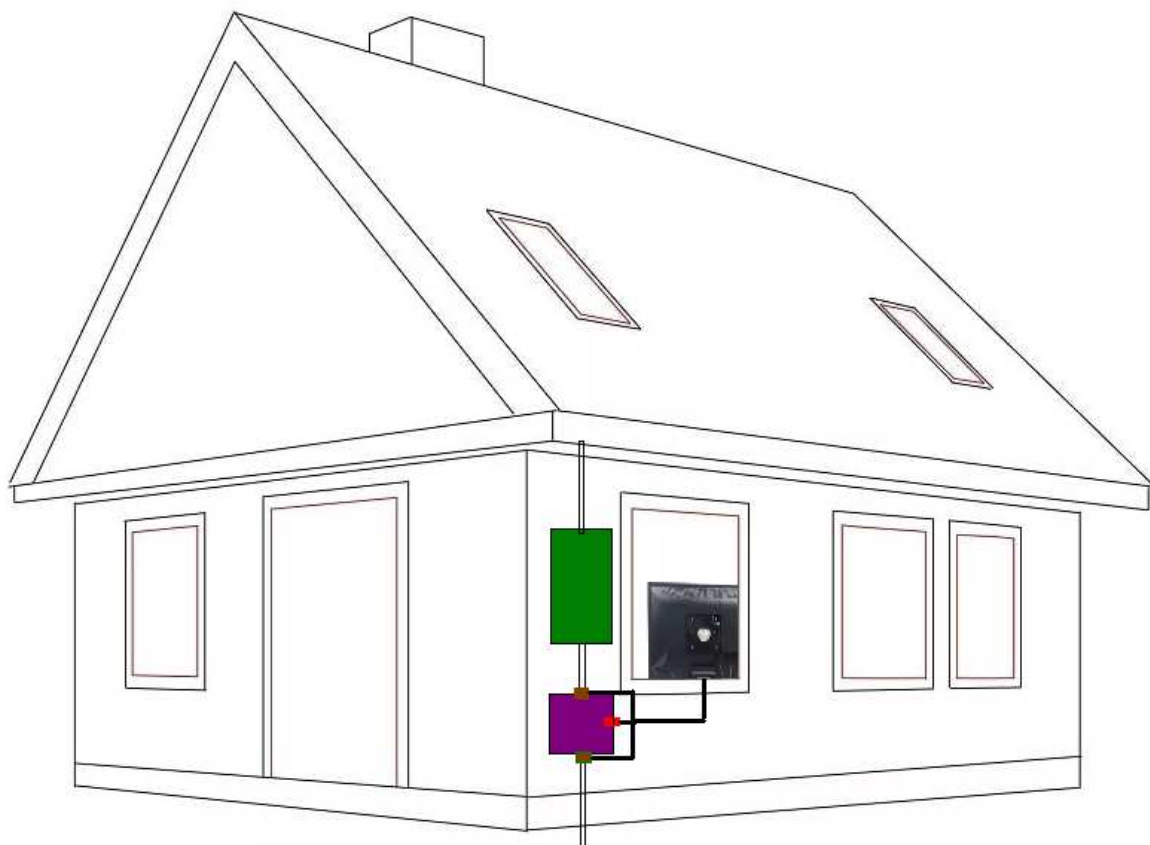


Рис. 5.4 Плувиограф кровельного типа (общая схема)

Автоматический подсчет собранных осадков предлагается осуществлять следующим образом: в сточную трубу последовательно включается буферный резервуар, электромагнитный водяной клапан, автомобильный бак с датчиком уровня топлива и сливной электромагнитный клапан.

При неполном баке первый электромагнитный клапан открыт, второй закрыт, вода попадает в бак датчика уровня воды, изменяя сопротивление, показывает степень заполнения бака. После того, как бак заполнится, на первый электромагнитный клапан поступает команда – закрыть, а на второй – открыть, при этом на компьютер передается по проводным или беспроводным каналам данных информация о заполнении бака водой. После слива топливный датчик, изменив сопротивление, закроет второй клапан, открыв первый, и в бак вновь начнет поступать вода (см. рис. 5.5).

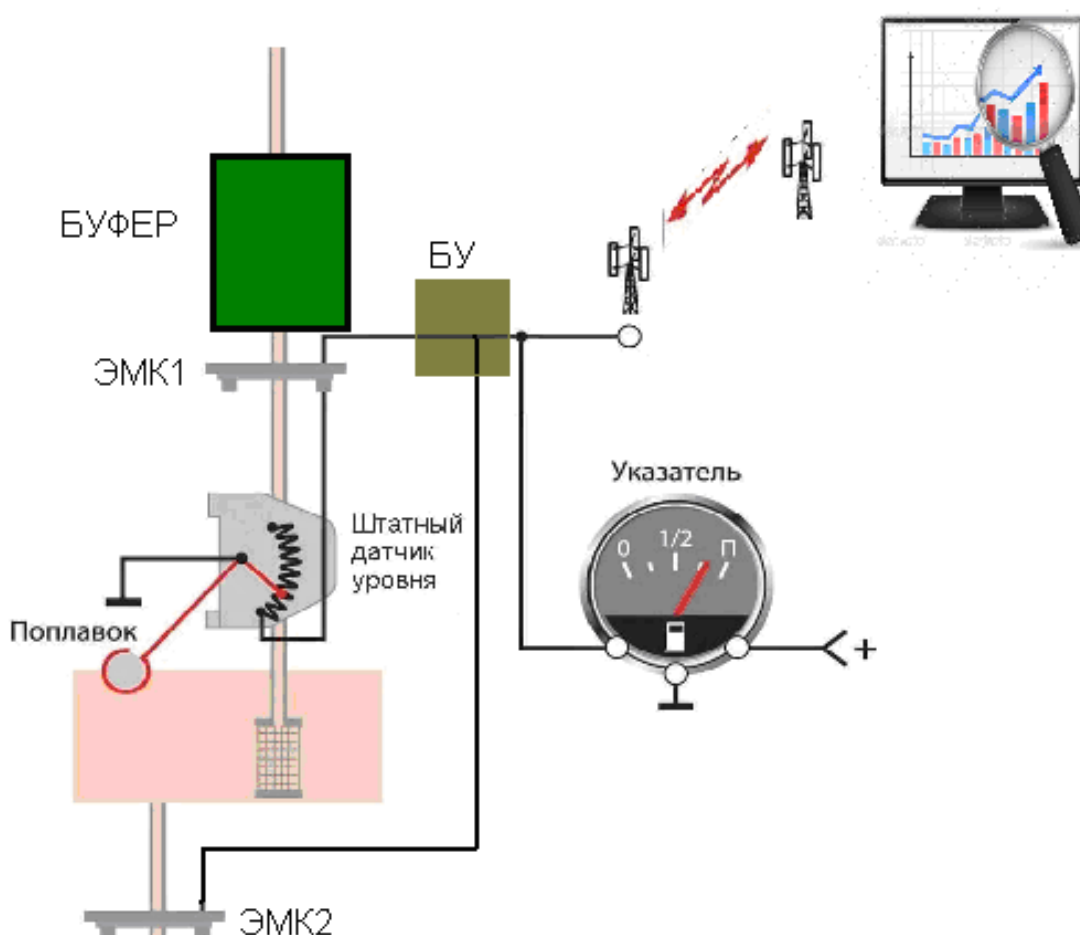


Рис. 5.5 Принципиальная схема pluвиографа кровельного типа

Для измерения интенсивности осадков на блок управления БУ, с заданным интервалом времени, происходит опрос датчика уровня воды. Таким образом, можно будет организовать сеть осадкомеров в любом месте, где есть помещения.

Основными плюсами данного типа pluвиографа являются большая площадь сбора, уменьшающая погрешность за счет объемов и доступность данного типа pluвиографа, которая приведет к удешевлению стоимости автоматизированной сети осадкомеров.

Для оценки влияния деформации ветрового поля на точность измерения осадков были проведены следующие опыты: были подобраны пять одинаковых ведер, пронумерованных и откалиброванных. Эти ведра были помещены в ветрозащитное укрытие (см. рис.5.6).



Рис. 5.6 Осадкосборники в ветрозащитном укрытии

Собранные в результате опыта осадки показали, что при отсечении влияния деформации ветрового поля погрешность измерения не превышает 5 процентов.

На следующем этапе было решено оценить степень точности измерения осадков при увеличении площади осадкоприемника. Для этого были собраны 3 экспериментальных комплекса для сбора осадков с кровли.



Рис.5.8 Расположение экспериментальных установок на полигоне Кызбурун

На Рис.5.8 изображены пункты размещения экспериментальных установок, при этом расстояние между пунктами не превышает 112 метров.

При безупречной установке осадкомера собранные им осадки будут представлять истинное количество осадков, выпадающих в данном районе. Практически, однако, это трудно достижимо из-за влияния ветра, поэтому особое внимание мы обращали на выбор места для осадкомерного поста.

Воздействие ветра необходимо рассматривать с двух точек зрения: воздействие ветра непосредственно на прибор, в результате чего обычно занижается количество осадков; а также влияние самого поста на воздушный поток, что часто является более важным и может приводить к излишкам или дефициту осадков, выпадающих в месте расположения поста [227].

Помехи, создаваемые ветровым препятствием, зависят от соотношения линейных размеров препятствия и интенсивности осадков. Влияние систематической деформации ветрового поля может быть уменьшено, если не полностью исключено, при соблюдении следующих условий: площадка для установки прибора выбирается таким образом, чтобы скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера была минимальной, но защита площадки не должна быть такой, чтобы окружающие предметы снижали количество осадков; окружение осадкомера таким, чтобы поток воздуха проходил над приемным отверстием осадкомера горизонтально. Все осадкомеры в данном районе или данной стране должны быть установлены в аналогичных условиях, и к их размещению следует применять одни и те же критерии. Осадкомер должен быть установлен так, чтобы его приемное отверстие было параллельно ровной горизонтальной поверхности почвы.

Измерительный участок подбирался так, чтобы со всех сторон иметь защиту от ветра различными предметами (деревьями, кустарником и т. д.) примерно одинаковой высоты. Для ветровой защиты осадкомеров следует избегать использования таких приспособлений, как заграждения в виде ряда деревьев, поскольку они увеличивают турбулентность на измерительном

участке. Не следует также устраивать отдельно стоящие щиты или другую несплошную защиту из-за различных, часто непредсказуемых воздействий на осадкомер. Если обеспечить приемлемую защиту от ветра невозможно, то следует проследить за тем, чтобы отдельные предметы находились на расстоянии не ближе, чем их четырехкратная высота. Выбирать площадку для установки осадкомера нужно с учетом приведенных ограничений, чтобы избежать погрешностей измерения, вызываемых воздействием ветра. Кроме того, следует соблюдать предосторожность, чтобы выбранный участок не вносил существенных искажений в скорость и направление ветра. Необходимо избегать оборудования площадок на склонах или у крутых откосов, спускающихся в одном направлении (особенно, если это направление совпадает с преобладающим направлением ветра).

Поверхность, окружающая осадкомер, может быть покрыта низкой травой, гравием или галькой, но необходимо избегать твердых и гладких покрытий, например, бетонных, с целью предотвращения излишнего попадания брызг в осадкомер.

Приемное отверстие осадкомера должно находиться как можно ближе к поверхности земли (потому что скорость ветра возрастает с высотой), но в то же время его высота должна быть достаточной, чтобы избежать попаданий брызг с земли. Во многих странах, в тех районах, где выпадает мало снега и нет опасности, что даже при сильном ливне почва будет покрыта лужами, осадкомеры устанавливаются на высоте 30 см. Там, где не могут быть соблюдены перечисленные условия, рекомендуется устанавливать осадкомер на стандартной высоте 1 м.

Комплекс № 1 состоит из листа площадью  $S = 2,074087 \text{ м}^2$ , смонтированном на противоголовую установку, наклоненным под углом  $11^\circ$  площадью сбора  $S_{\text{сб}} = 2,036882 \text{ м}^2$  и трех ведер (см. рис.5.9). Причем одно ведро под номером 4 находится в ветрозащитном укрытии, а два ведра под номерами 2 и 5 на расстоянии 1 метра друг от друга. Опыт с пятью ведрами в ветрозащитном укрытии показал, что погрешность в измерении осадков не

превышает 10 процентов. Для оценки влияния ветра на измерение количества осадков одно ведро было помещено в ветрозащитное укрытие, а два других расположены на открытом пространстве. Это позволит сравнить количество осадков в ветрозащитном укрытии и на открытом пространстве, позволит также сравнить количество осадков, измеренных в двух ведрах, расположенных в непосредственной близости на открытом пространстве.

Комплекс №2 состоит из листа площадью  $S = 2,1525 \text{ м}^2$ , смонтированным на противогодавую установку, наклоненным под углом равным  $15^\circ$  и площадью  $S_{\text{сб}} = 2,079155 \text{ м}^2$ , и одного калибровочного ведра (см. рис.5.10). Данный комплекс позволит сравнить количество осадков между осадкомером кровельного типа и ведром, между двумя осадкомерами кровельного типа с соизмеримой площадью, расположенными на расстоянии 140 метров.



Рис.5.9 Установка 1, ведра: №2, №5, №4 (в ветрозащитном укрытии)

Комплекс №3 состоит из листа площадью  $S = 35,29012 \text{ м}^2$  с углом наклона  $7,5^\circ$  и площадью  $S_{сб} = 34,98983 \text{ м}^2$  (см. рис. 5.108.в.), одной метеостанции Davis Vantage PRO2 и одного калибровочного ведра №3 (см. рис. 5.11. б). Данный комплекс позволит сравнить показания метеостанции челночного типа с показаниями ведра и плювиографа кровельного типа между плювиографами большой и малой площади. При этом калибровочное ведро и осадкомер Vantage PRO2 отгоризонтированы и откалиброваны.



Рис. 5.10 Установка №2, ведро №1



а )



б)



в)

Рис.5.11 а) флюгер, б) осадкомер челночного типа и калибровочное ведро, в) осадкомер кровельного типа.

Методика расчета осадков, собранных с водосборников кровельного типа (Таблица 5.1)

Для расчета количества осадков, собранных с осадкомера, была использована следующая методика:

1. Измерялась площадь поверхности кровли с поправкой по периметру в два сантиметра на разбрызгивание дождя.
2. Определялась проекция площади на плоскость.
3. Измерялась площадь поверхности сосуда, в который собирались осадки.
4. Площади суммировались.
5. Учитывалось направление ветра.
6. Собранные осадки делились на площадь.

Таблица 5.1 Габариты водосборников кровельного типа

	У1	У2	У3
Ширина, мм	105	52	540
Длина, мм	200	375	650
Угол наклона,°	15	11	7,5
Площадь, м <sup>2</sup>	2,22	2,07	34,99

По данным, полученным с метеостанции Vantage Pro2 (Приложение 1) можно определить точное время начала и конца выпадения осадков (Таблица 5.2).

Таблица 5.2 Параметры измеренных осадков

Дата начала	Время начала	Дата окончания	Время окончания	Продолжительность осадков	Num. Rain
15.08.2017	6:44	15.08.2017	8:24	1:40	2,6
17.08.2017	19:39	17.08.2017	20:31	0:52	0,6
17.08.2017	21:21	18.08.2017	3:01	5:40	16
18.08.2017	3:51	18.08.2017	4:27	0:36	0,6
18.08.2017	4:34	18.08.2017	7:53	3:19	3,8
18.08.2017	10:34	18.08.2017	15:39	5:05	4,6
20.08.2017	18:53	20.08.2017	20:54	2:01	0,8
23.08.2017	16:06	23.08.2017	17:16	1:10	10,8

Для оценки влияния площади, водосборника и направления ветра были проведены следующие опыты:

Собирались осадки с двух кровель одинаковой площади, но разных линейных размеров. При этом угол места и угол по азимуту менялись. В результате опытов было выявлено, что при повороте установки перпендикулярно направлению ветра были незначительные потери в количестве собранных осадков. Это связано с увеличением влияния разбрызгивания. Для уменьшения влияния разбрызгивания необходимо устанавливать бортики по периметру водосборника.

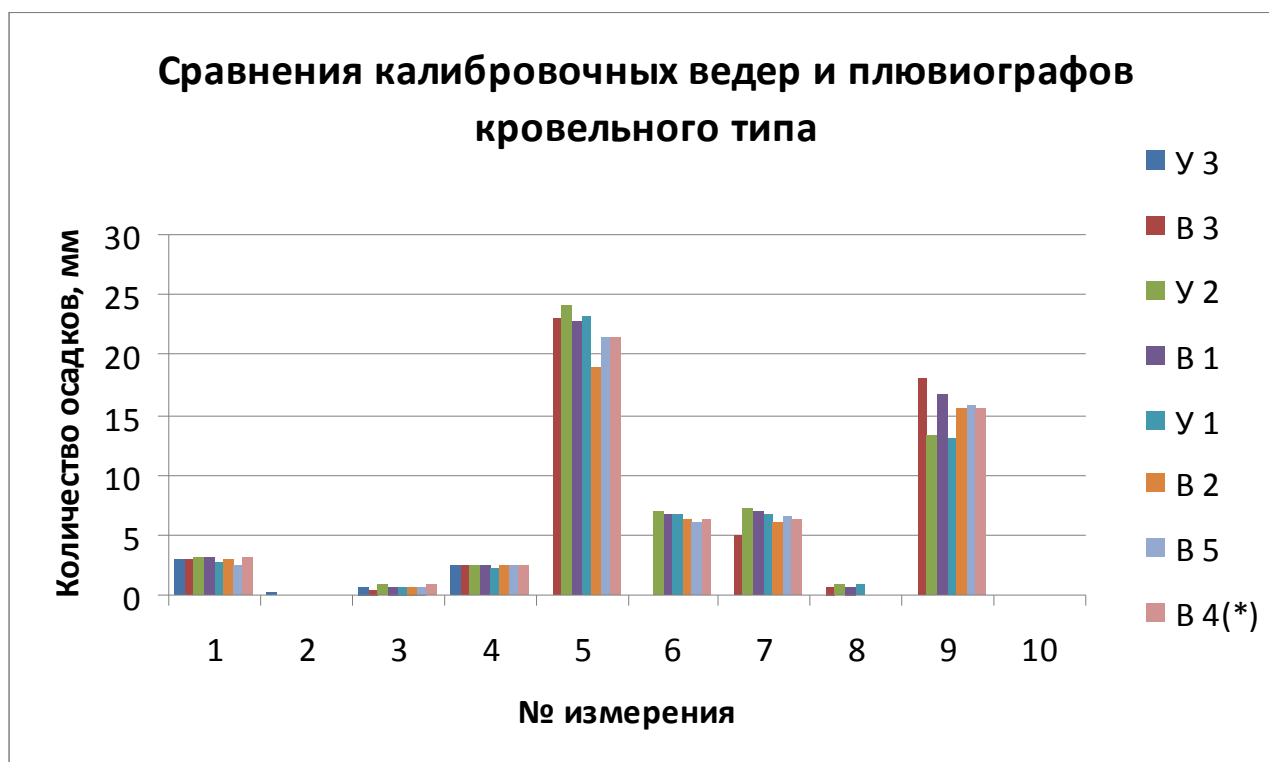


Рис. 5.12 Сравнение калибровочных ведер и pluviographов кровельного типа

На рис.5.12 изображен график количества осадков, измеренных различными приборами. Где Y1-Y3 – установки 1,2,3; B1-B5 – ведра 1,2,3,4,5 соответственно, B4(\*) ведро в ветрозащитном укрытии. Из данного графика видно, что расхождения в показаниях о количестве осадков резко отличаются, при этом разница доходит до 25 процентов. В случае первого опыта, когда за 1 час 40 минут (Таблица 5.2) по данным автоматического осадкомера выпало 2,6 мм, данные по другим типам осадкомеров колебались от 2,49 до 3,17 мм. Интересен также факт второго опыта, когда осадкомер кровельного типа за 52 минуты показал количество осадков равное 0,18 мм, а ведра и Vantege Pro2 показали нулевые значения. Последующие опыты показали, что данные различных типов измерительных приборов, разнятся. При этом разница достигает 30 процентов.

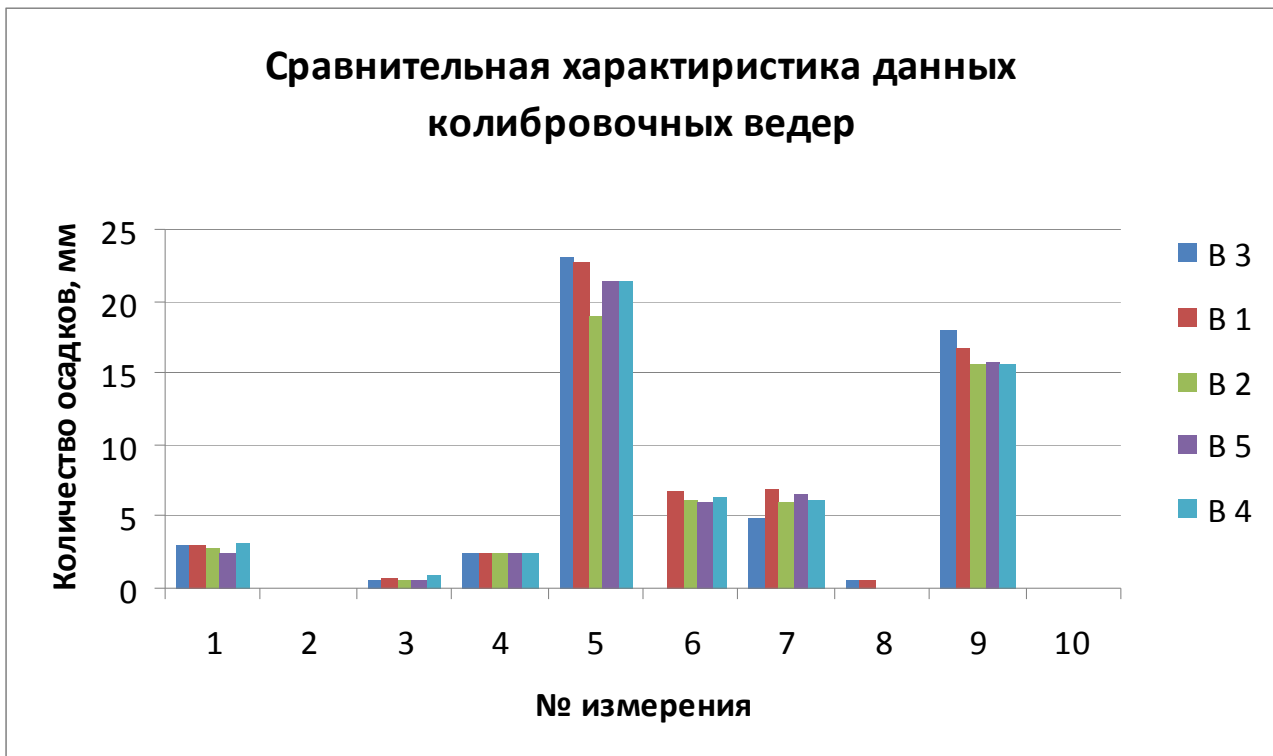


Рис. 5.13 Сравнение количества осадков, измеренных с помощью ведер

На рис. 5.13. изображен график сравнения количества осадков, измеренных ведрами, где четвертое ведро находилось в ветрозащитном укрытии. Из данного графика видно, что разброс в показаниях ведер достигает 20-25 процентов. При этом ведро, находящееся в ветрозащитном укрытии, дает примерно среднее значение по всем измерениям. Это связано, прежде всего, с деформацией ветрового поля.



Рис. 5.14 Сравнение количества осадков, измеренных с помощью экспериментальных установок кровельного типа

На рис.5.14 изображен график сравнения данных плювиографов кровельного типа. По данному графику видно, что расхождения сопоставимы с расхождениями показаний осадкомеров, находящихся в ветрозащитном укрытии, и не превышают 5 процентов.

Первый опыт показал, что малые осадки считаются лучше при больших площадях. 13.05.2017 выпали осадки, осадкомер площадью 34,99 м<sup>2</sup> показал осадки равные 0,185 мм, притом, что ни с одного калибровочного ведра не удалось собрать осадки, которые можно было бы измерить. Метеостанция также показала нулевой слой осадков, так как минимальный размер осадков, учитываемый электронным осадкомером челночного типа Vantage Pro 2, равен 0,2 мм. При этом данные с двух других осадкомеров кровельного типа идентичны.

При интенсивных осадках эффективность плювиографа кровельного типа опытным путем была подтверждена. Три осадкомера показали практически идентичные результаты притом, что осадкомер Vantage Pro 2 дал ошибку в

66%. Более высокую степень корреляции с новым типом pluviographa, как при малых, так и интенсивных осадках (см. рис. 5.15-5.16). По данным МРЛ, 18.08 с 3 до 4:30 часов, были зафиксированы в районе полигона, осадки от 0,5 до 1 мм, при этом pluviograph в этот период зафиксировал 0,8 мм по данным осадкомера Vantage PRO2 – 0,6 мм (см. рис.5.14).

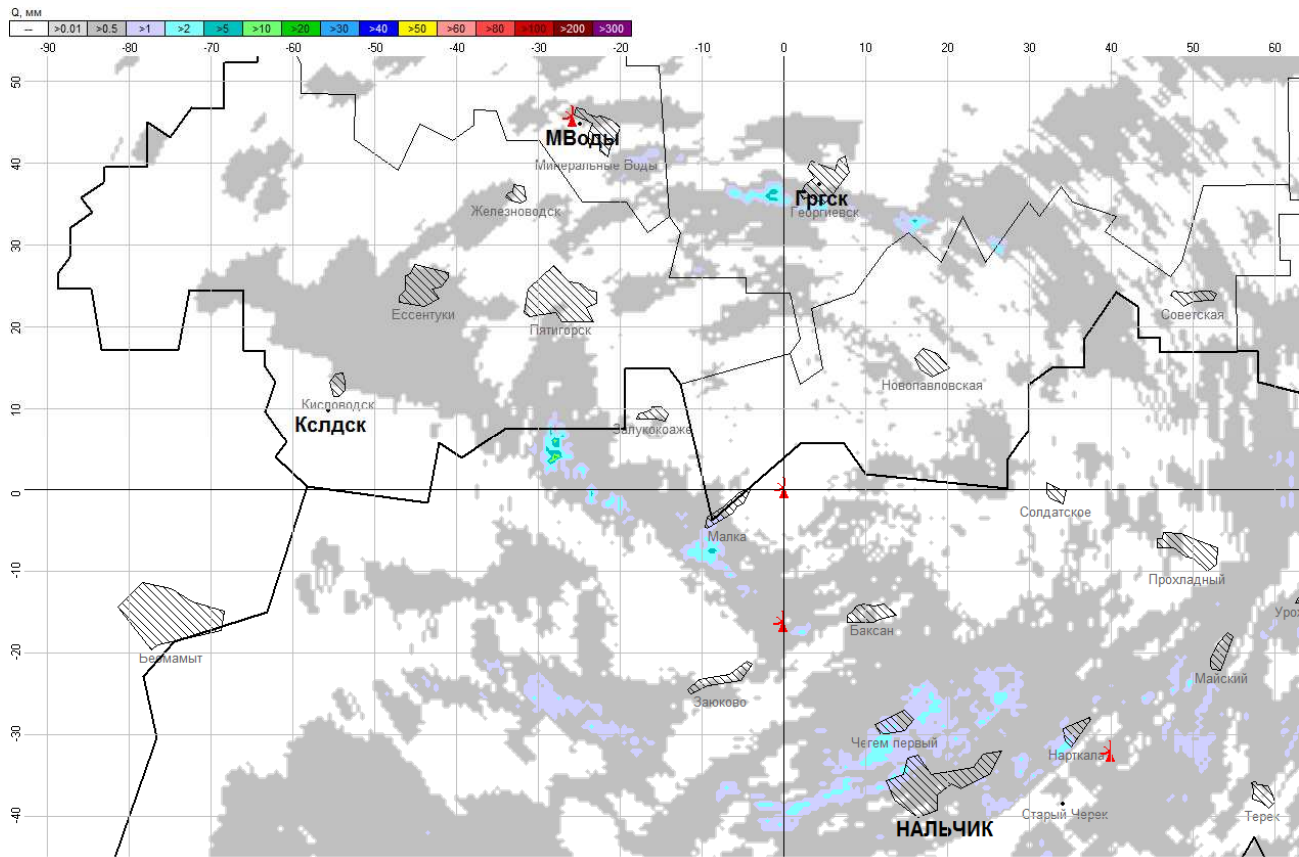


Рис. 5.15 Осадки, измеренные МРЛ Куба-Таба, от 18.08.2017 с 04:00 до 05:00

Осадки, зафиксированные МРЛ за 18.08.2017 в районе полигона, были в пределах от 10 до 20 мм, при этом pluviograph в этот период зафиксировал 12,3 мм, по данным осадкомера Vantage PRO2 – 9 мм.

Радиолокационные, грозопеленгационные, спутниковые и наземные данные метеостанций и постов являются основными источниками метеорологической информации. Однородность этих источников информации важна для правильной интерпретации и оценки метеорологической информации. Одними из самых неоднородных источников информации являются данные метеостанций, плювиографов и осадкомеров [161,171,183]. Длительные детальные исследования погрешностей осадкомерных приборов [59-62,227,228], показали, что осадкомеры вносят систематические ошибки, нарушающие однородность данных [74,75,77,96]. Для восстановления климатической однородности измеренных осадков приходится проводить всевозможные математические манипуляции. Под восстановлением климатологической однородности подразумевается исключение влияния несовершенства и изменение методик измерений, типов сетевых приборов, изменений

сроков наблюдений, а также изменение во времени условий наблюдений [95].

Количество осадков на наблюдательной метеорологической сети Российской Федерации с середины 1950-х годов определяется с помощью осадкомера Третьякова, до этого стандартным сетевым прибором являлся дождемер с защитой Нифера. Оба этих осадкомерных прибора обладают систематическими погрешностями, вызванными аэродинамическими свойствами приборов, процессами испарения, конденсации и смачивания. Эмпирический анализ данных об изменении климата основывается на результатах непосредственных приземных наблюдений за метеорологическими величинами [151,174,242].

Точность измерения жидких осадков играет важную роль для оценки многих гидрометеорологических параметров. В последнее время, с развитием сети штормооповещения возникла острая необходимость приведения всей гидрометеорологической информации как радиолокационной, так и наземной к единому формату данных [124].

По данным комиссии ВМО по приборам и методам наблюдений (СМО), сегодня в мире установлено более 45 тыс. осадкомеров, из них большинство составляют датчики поплавкового (рис.5.1) и челночного типов (рис. 5.2). На долю остальных датчиков приходится порядка 5 процентов [208,310,311].

В России информацию об осадках получают в основном из сети пювиографов поплавкового типа П-2 [208]. За рубежом для измерения количества осадков используют в основном осадкомеры челночного типа.

У всех этих датчиков есть существенные недостатки, заключающиеся в ограниченности размера водосборника. Основным фактором, влияющим на точность измерения осадков, является деформация ветрового поля приемным отверстием осадкомера [208]. Для повышения однородности и сопоставимости радиолокационной и наземной информации, необходимо увеличить площадь осадкоприемника

и тем самым сократить влияние деформации ветрового поля. За счет усреднения по площади водосборника, наземные данные об осадках лучше коррелируют с радиолокационной информацией [104].

#### **5.4 Оптимизация радиолокационных наблюдений при проведения противоградовых работ**

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, существующей метеорологической обстановки, а также выявлению закономерностей определенных физических процессов, наблюдаемых на защищаемых от града территориях.

На этапе зарождения работ по защите сельскохозяйственных культур от града, защищаемые территории в СССР составляли порядка 10 млн. га [209]. В период политических и экономических перемен 1989 г. в России были сокращены площади защиты. И лишь в период 2000 по 2012 гг. площади противоградовой защиты (ПГЗ) в Российской Федерации расширились до 2,5 млн. га [191,209]. На сегодняшний день все работы по ПГЗ регламентированы и подчинены жестким требованиям руководящих документов, которые постоянно совершенствуются и дополняются в соответствии с эволюцией в технике и технологии воздействия на градовые процессы.

Порядок проведения радиолокационных наблюдений в период сезона ПГЗ проводится с помощью автоматизированной системы (АСУ) управления противоградовыми операциями, состоящей из аппаратных и программных средств круглосуточно по определенному регламенту [208-211]. Согласно

данному регламенту, дежурный инженер по воздействию ежедневно должен принимать прогнозы погоды, а также анализировать и оценивать степень градоопасности облаков [210]. Для оценки степени градоопасности облаков в каждом цикле обзора оператору необходимо измерять и сохранять параметры наиболее мощных конвективных ячеек (КЯ), нумеруя их в первом обзоре с запада на восток, с севера на юг в хронологическом порядке их зарождения. Также оператор должен определять категорию объекта воздействия (ОВ) и тип градового процесса, проводить анализ особенностей пространственного строения КЯ, выявляя наличие и навеса радиоэха КЯ, его высоту и протяженность.

Для усовершенствования и оптимизации этапов воздействия на градовые процессы были разработаны методы автоматической идентификации КЯ, автокалибровки локаторов сети штормооповещения, автоматической идентификации навеса радиоэха, а также метод сопоставления радиолокационной и наземной информации [105,123,126].

Для оптимизации порядка проведения радиолокационных наблюдений 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.5.19).

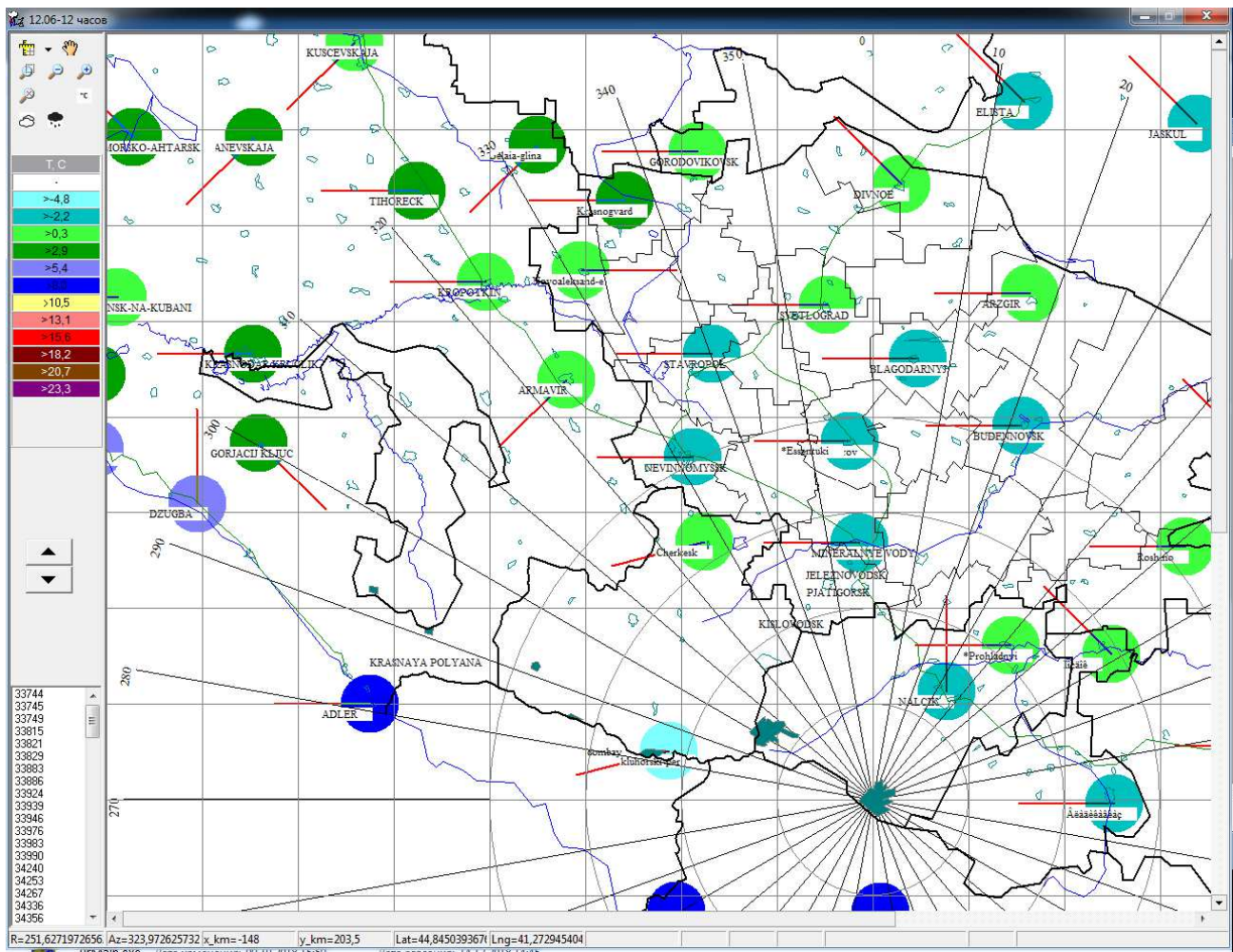


Рис. 5.19 Пример тепловой карты с нанесенными данными о температуре и направлении ветра на метеостанциях

Цветовая шкала автоматически формируется в зависимости от максимального и минимального показателя температуры, давления, влажности и балла облачности, где кружками обозначены места расположения на карте метеостанций (рис.5.20). На основании этих данных можно в оперативном режиме отслеживать метеообстановку на прилегающей к ЗТ территории.

T, C	P, mmRtSt	BalObl	Vlag, %
.	.	.	.
>-4,8	>590,0	>0,0	>0,0
>-2,2	>605,9	>0,9	>9,1
>0,3	>621,8	>1,8	>18,2
>2,9	>637,7	>2,7	>27,3
>5,4	>653,6	>3,6	>36,4
>8,0	>669,5	>4,5	>45,5
>10,5	>685,5	>5,5	>54,5
>13,1	>701,4	>6,4	>63,6
>15,6	>717,3	>7,3	>72,7
>18,2	>733,2	>8,2	>81,8
>20,7	>749,1	>9,1	>90,9
>23,3	>765,0	>10,0	>100,0

Рис.5.20 Пример автоматически сформированных градаций температуры, давления, балла облачности и влажности

– При появлении отражаемости в области радиолокационного зондирования 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. 5.21). При этом определяет категорию, направление и скорость перемещения объекта воздействия [123].

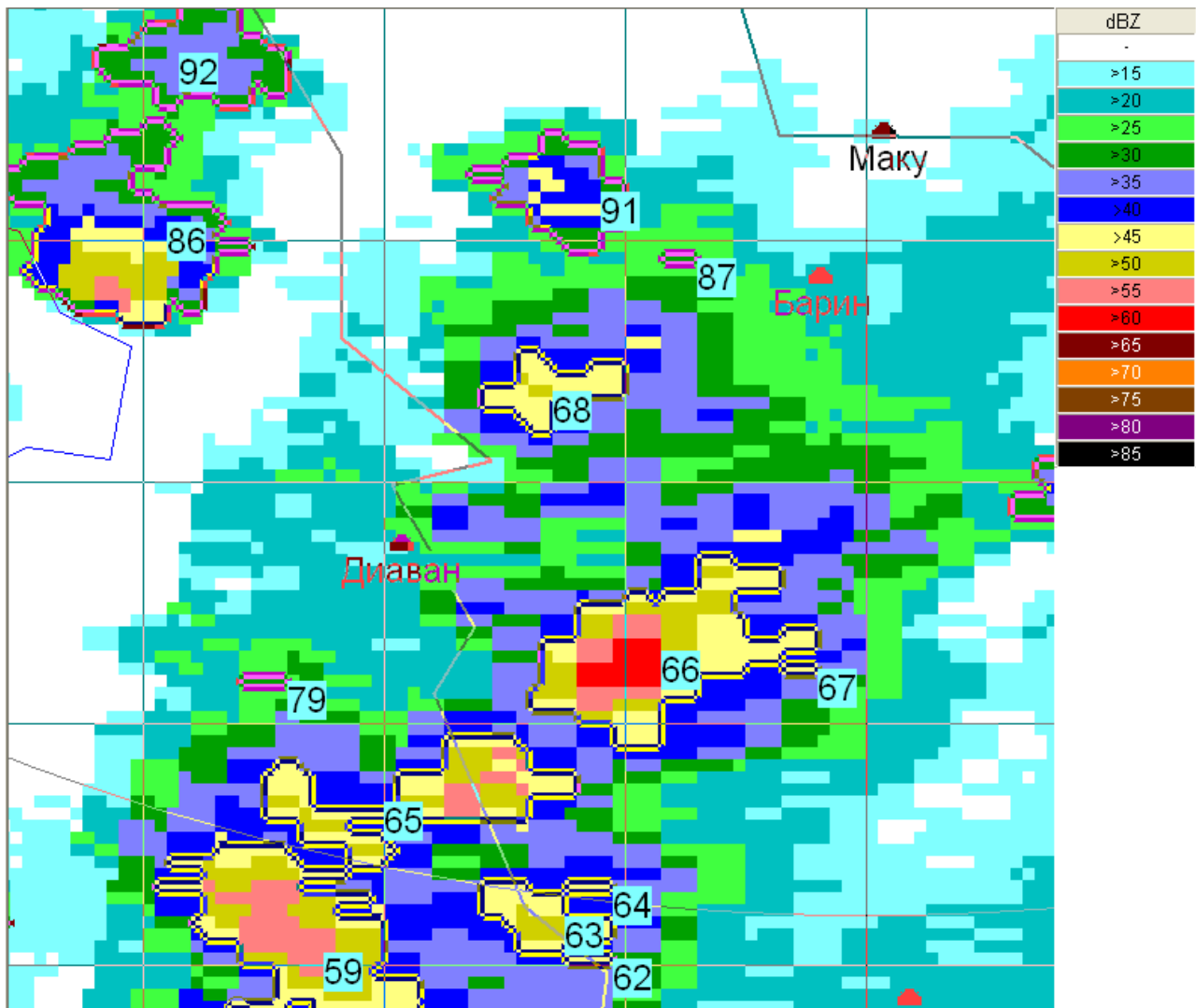


Рис. 5.21 Выделение мощных конвективных ячеек с периметром ячейки более 10 км

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 [123]. 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 [54].

Автоматическая идентификация навеса радиоэха базируется на методе автоматической идентификации КЯ, за навес радиоэха 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.

### **5.5 Перспективы оптимизации работы радиолокационной сети**

Метеорологическая служба Государственной сети Росгидромета согласно [210] осуществляет:

- проведение регулярных метеорологических наблюдений;
- выполнение наблюдений за опасными метеорологическими явлениями (ОЯ);
- выполнение первичной обработки результатов наблюдений;
- передачу в установленном порядке оперативной информации об ОЯ, в соответствии с указаниями руководящих органов; а также (в зависимости от интересов потребителя):
  - штормовое оповещение радиолокационной информацией об облаках, осадках и связанных с ними неблагоприятных и опасных явлениях погоды прогностических подразделений Росгидромета;
  - организацию метеообеспечения авиации в соответствии с требованиями, предъявляемыми к автоматизированным системам управления воздушным движением, изложенными в [208];
  - измерение интенсивности и количества осадков для использования в

метеорологических и гидрологических прогнозах и др. [173,239,240]

Большая часть локаторов сети штормоповещения к началу XXI выработала свой технический ресурс. Сеть штормоповещения нуждалась в срочной модернизации. По этой причине в 2008 г. постановлением Правительства Российской Федерации были утверждены две федерально-целевые программы «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации» и «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки на территории РФ». В 2010 году произошло объединение этих программ, и была запланирована установка 140 доплеровских метеорологических радиолокатора С-диапазона (ДМРЛ-С) [68,90,137].

На сегодняшний день радиолокационная сеть России включает 10 эксплуатируемых единиц некогерентных метеорадиолокаторов 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 [150,156]. В целом, радиолокационная сеть в ближайшие годы будет полностью модернизирована и устаревшие МРЛ-5 уйдут в прошлое.

С 2004 г. радиолокаторы Росгидромета передают данные наблюдений в ведомственную сеть автоматизированной системы передачи данных (АСПД) в метеорологическом коде FM-94 BUFR (Рис.5.22) что позволяет строить объединенные радиолокационные карты с разрешением 4x4 км [99].

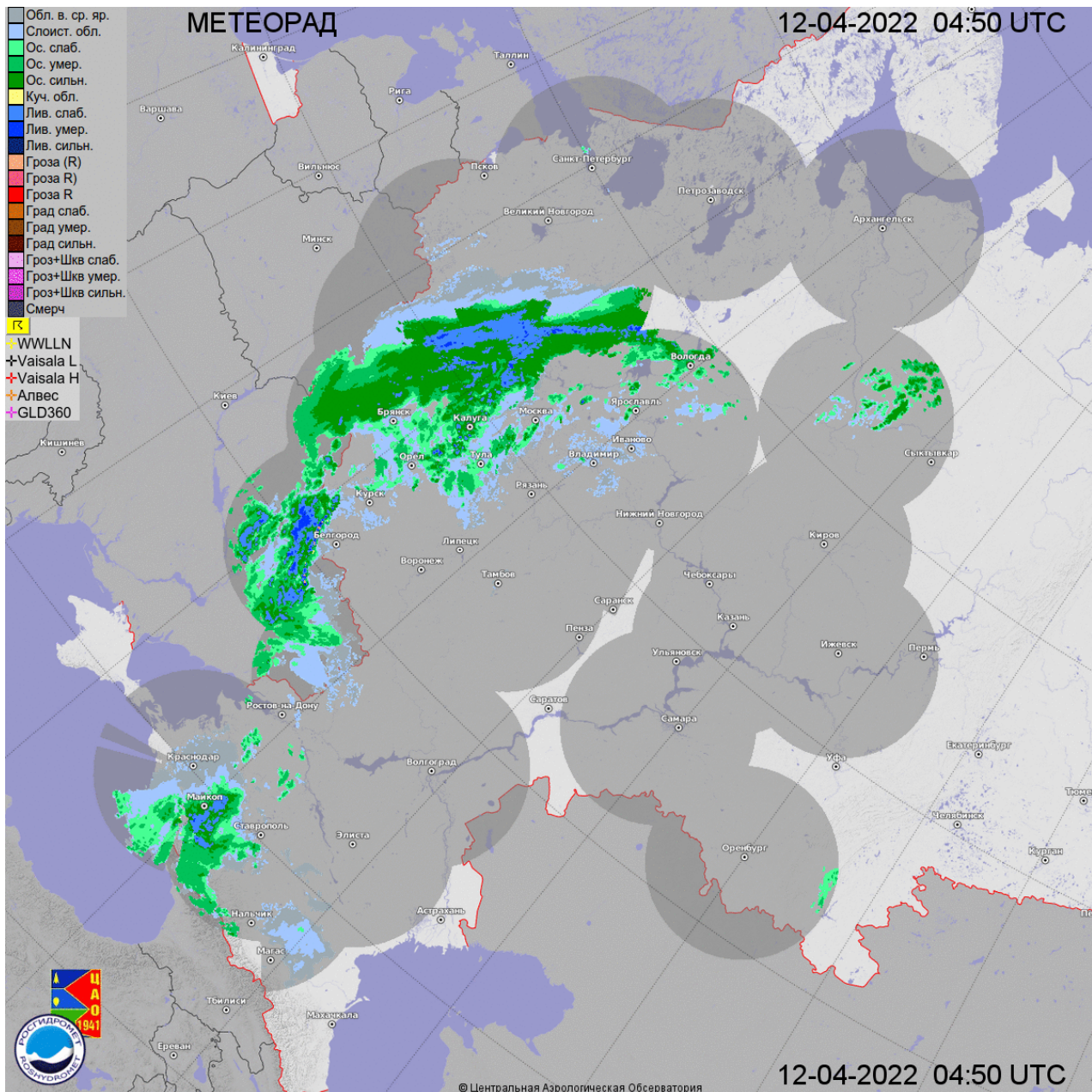


Рис.5.22 Пример сопряженной карты метеорадиолокационной сети

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

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

Метеорологический код FM-94 BUFR, да и в целом, любой вторично обработанный продукт автоматизированных систем 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 [105], можно автоматически локализовать конвективные ячейки (КЯ). Конвективная ячейка – это область радиоэха, ограниченная замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости, имеющая одну конвективную вершину и питающаяся одним восходящим потоком [17]. Далее переводя координаты точек, входящих в локализованную 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 [19,231].

В случае применения доплеровских радиолокаторов эта проблема решается путем селекции радиоэха неподвижных целей, создающих радиоэхо с нулевым или близким к нулю доплеровским сдвигом [84]. К сожалению, данный алгоритм не всегда срабатывает. Действия ветра создают колебания объектов, попадающих в область зондирования, 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 [13]. 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 [18]. В то же время отраженный от местных объектов сигнал при аномальной рефракции автоматизированной системой, при применении метода автоматической идентификации КЯ воспринимается как конвективная ячейка. В случае, если автоматизированная система в утренние и вечерние часы фиксирует локальные КЯ с высокими значениями отражаемостей при низких значениях верхней границы облачности, псевдо КЯ считают аномальным сигналом и вычитают.

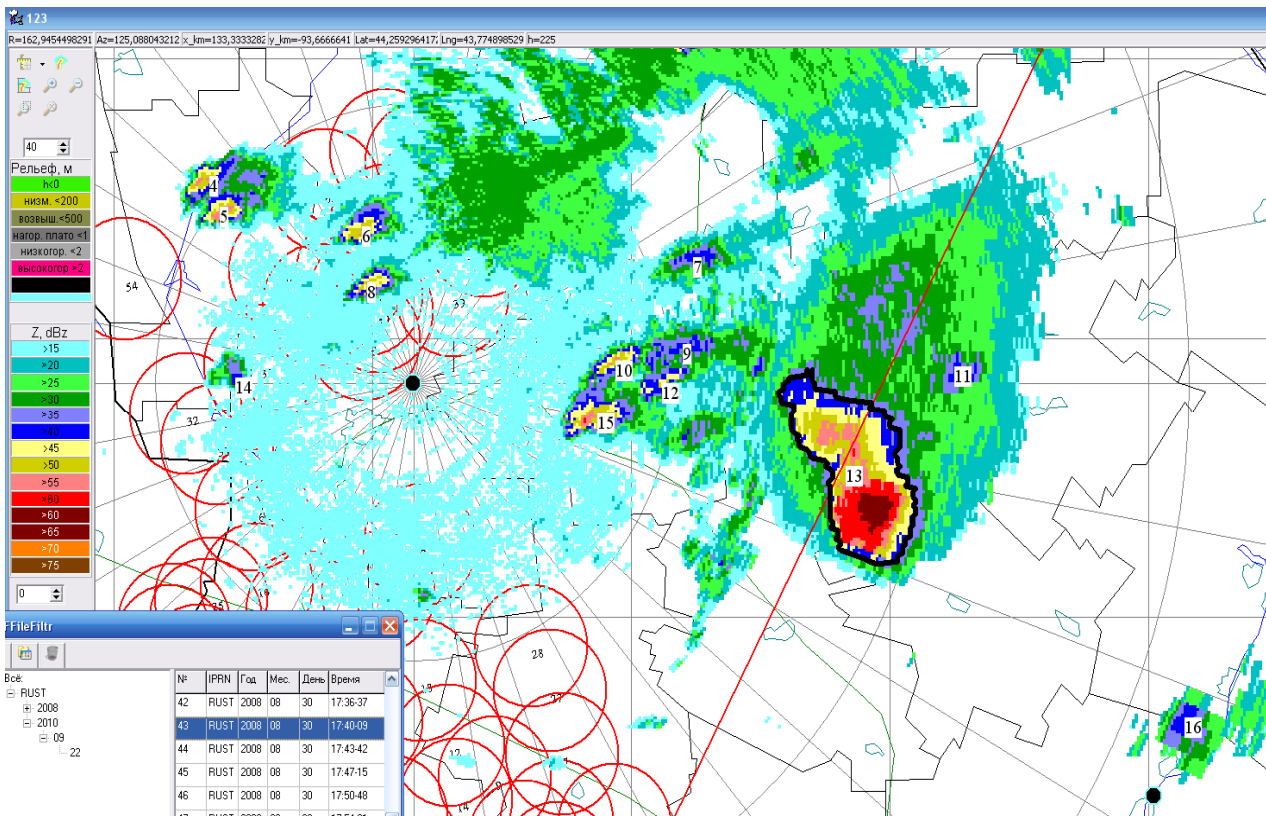


Рис. 5.23 Карта с отображением линии, равноудаленной от двух локаторов с попаданием в СЗ мощной КЯ.

МРЛС РФ интенсивно обновляется. И в ближайшие годы морально и физически устаревшие МРЛ-5 уйдут в прошлое. Радиолокационная сеть России работает достаточно стабильно, но со временем оборудование устаревает, приемно-передающие узлы локаторов теряют чувствительность. Именно в это время крайне актуальным будет метод автокалибровки радиолокационной сети.

Суть метода заключается в калибровке сети по эталонному локатору, проверенному и откалиброванному по методу стандартной мишени [18]. Далее производится автоматическое сравнение характеристик облаков, находящихся на равном удалении от двух локаторов (рис.5.23). Для этого, используя метод автоматической идентификации конвективных ячеек, определяют ячейки, находящиеся на равном удалении от двух локаторов. Затем, используя метод трассировки луча, в основе которого лежит идея подсчёта количества пересечений горизонтального луча, исходящего из центральной точки конвективной ячейки со сторонами области, равноудаленной от двух локаторов

на 5 км, и дальнейшего сравнения характеристик КЯ, наблюдаемой от равноудаленных локаторов, с последующей корректировкой данных поверяемого локатора [126].

### **ВЫВОДЫ.**

1) Предложенный метод измерения осадков запатентован и может использоваться для калибровки МРЛ, для обновления и дополнения существующей сети метеостанций, для селеоповещения и т.д.

2) Предлагаемый плювиограф показал свою работоспособность и надежность при значительно меньших затратах по сравнению с аналогичными приборами.

3) Малые осадки лучше считаются плювиографом с большой площадью водосбора.

4) Показания плювиографа кровельного типа лучше коррелируют с радиолокационной информацией.

5) Развитие и модернизация существующей радиолокационной сети повышают требования к алгоритмам и методам решения задач обработки и визуализации радиолокационных данных. В рамках данной работы предложен комплекс мер, способных повысить достоверность и надежность работы МРЛС России. Большая часть рассматриваемых в работе методов и алгоритмов реализована в программном комплексе обработки метеорологической информации для статистических исследований грозоградовых процессов.

6) Разработка новых методов и программных средств является неотъемлемой составляющей оптимизации проведения радиолокационных наблюдений в период ПГЗ. Комплексный подход, включающий в себя автоматизированную обработку радиолокационной и наземной информации от метеостанций и постов, позволяет повысить эффективность работ по противоградовой защите. Метод автоматической идентификации КЯ позволяет снизить требования к квалификации персонала, проводящего

активные воздействия на градовые процессы. За счет участия автоматики в оценке тенденции развития КЯ, противоградовая служба может значительно сократить траты по активному воздействию на диссипирующие облака как первой, так и второй категорий.

7) Предложен комплекс мер, способных повысить достоверность и надежность работы МРЛС России. Большая часть рассматриваемых в работе методов и алгоритмов реализована в программном комплексе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

1. Разработана методика и программа для ЭВМ, позволяющая автоматизировать процесс идентификация 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 штормооповещения 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 за 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 региональный, многолетний, годовой и суточный ход.

3.3. Детально изучены многолетний, годовой и суточный ход градоопасности двух регионов в отдельные годы и все годы наблюдений. Установлены наиболее градоопасные периоды года и суток, выявлены региональные особенности в повторяемости КЯ градовых процессов разной интенсивности и соотношении 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 грозовыми разрядами.

3.5. Построены карты явлений погоды с указанием векторов направления и 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- и градоопасные районы и показана зависимость грозовой активности от высоты местности. Получен временной ход частоты внутриоблачных грозовых 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Аджиев А.Х. и др. Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. №586. С. 93—116.
2. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Гергоков А.Х., Чочаев А.Б., Геккиева Ж.М. Методы калибровки метеорологических радиолокаторов. Метеорология и гидрология. 2017. № 3. с. 114-121.
3. 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 Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, «Теоретические и экспериментальные исследования облаков» – С-Пб., 18-20 ноября 2008 . – 42 с.
4. Абшаев А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная идентификация конвективных ячеек в кучево-дождевой облачности. // Материалы IX конференции молодых ученых. // – Нальчик, 2008, 47-51с.
5. Абшаев А.М., Жарашуев М.В. Оптимизация подготовки и передачи радиолокационной информации в сеть штормооповещения и метеообеспечения авиации. // Материалы IX конференции молодых ученых. – Нальчик, 2008. – С. 52-57
6. Абшаев М. Т., Батищев В. Г., Инюхин В. С., Тапасханов В. О. Автоматизированная система активного воздействия на градовые процессы. // Тезисы докладов на научной конференции Росгидромета. Секция 6. – Москва, 1996. – С. 62 63.
7. Абшаев М.Т. Новый метод воздействия на градовые процессы // Тр. Всес. конф. по АВ на гидромет. проц.– Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 118-126.

8. 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.
9. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения. // Радиолокационная метеорология. – С.-Пб: Гидрометеиздат, 2010. – С. 42-46.
10. Абшаев М.Т., Беккиев А. Ю., Тапасханов В. О., Тебуев А. Д. Проект Северо-Кавказской автоматизированной радиолокационной метеорологической сети. // Труды ВГИ. – 2002. – Вып. 94. С 23-79.
11. Абшаев М.Т., Буранова И.А. Малкарова А.М. Особенности климатологии града в разных регионах. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. // Естественные науки, 2009, №5, с. 116-120.
12. 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.
13. 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6230).
14. Абшаев М.Т., Шевела Г.Ф., Васильев Г.Ф., Ваксенбург С.И. Специализированный радиолокатор градозащиты и штормооповещения МРЛ-5 и его метеорологическая эффективность // Труды ВГИ, Вып. 33, 1975. С. 3 – 30.

15. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л. // Гидрометеиздат, 1980. 231 с.
16. Абшаев, А.М. Теоретические и экспериментальные исследования активного воздействия на градовые процессы и создание автоматизированной технологии обнаружения и предотвращения града: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 25.00.30 / А.М. Абшаев; ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». // Нальчик, 2014. - 309 С.
17. Абшаев, М.Т. Радиолокационное обнаружение града / М.Т. Абшаев // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. -1982. - № 5. - С. 483 - 494.
18. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Гергоков А.Х. Фильтрация аномального радиоэха при радиолокационных наблюдениях облаков и осадков// Тезисы конференции молодых ученых ВГИ, посвященной 100-летию проф. Г. К. Сулаквелидзе. - 22-23 мая 2013 г. С 9-11
19. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В. Руководство по организации и проведению противоголовых работ // ООО «Печатный двор». - Нальчик, 2014. 9- 319 С.
20. Автоматизированная радиолокационная система управления и обработки информации радиолокатора МРЛ-5 «АСУ-МРЛ». Руководство по эксплуатации АСУ.001.010 РЭ. – Нальчик, 2007. – 73 с.
21. Автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной информации о параметрах облаков и осадков / Губарчук А. Н., Иванников А. П., Иванов А. А., Мельничук Ю. В. и др. // Труды VI Всес. совещ. по радиометеорол. – Ленинград:, 1984. – С. 15-19.
22. Агемян Т. А. Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. «Кластерный анализ» / «Факторный, дискриминантный и кластерный анализ»: пер. с англ.; Под. ред. И. С. Енюкова. — М.: «Финансы и статистика», 1989—215 с.

23. Аджиев А. Х., Богаченко Е. М. Импульсно-временные характеристики излучения грозовых облаков в дециметровом диапазоне. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1988, № 8, с. 973—979.
24. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Тумгоева А.А. Влияние орографии на характеристики грозовой деятельности // Известия вузов. северо-кавказский регион. 2008. № 2. С 109-112.
25. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А. и др. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS8000 // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. №3. С. 55—63.
26. 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.
27. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Андриевская В.Ю., Юрченко Н.В., Кудринская Т.В., Редин А.А. Мониторинг характеристик грозовой активности на юге европейской части России. – Известия ЮФУ №4, 2017. С212-213.
28. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Гятов Р.А. и др. Взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительности гроз по данным визуальных и инструментальных наблюдений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. №3. С. 30—36.
29. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. - Метеорология и гидрология №1, 2013. - С. 5-11.
30. Аджиев А.Х., Снегуров А.В., Снегуров В.С. и др. Грозопеленгационные системы Росгидромета на Европейской территории России // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда. 7—9 июля 2014 г. Санкт-Петербург. СПб., 2014. С. 40—41.

31. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А. и др. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS8000 // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. №3. С. 55—63.
32. Аджиев А.Х., Богаченко Е.М. Импульсно-временные характеристики излучения грозовых облаков в дециметровом диапазоне // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1988. № 8. С. 973-979.
33. Аджиев, А.Х. Характеристики грозовой активности и параметры молниевых разрядов на территории юга европейской части России. / А.Х. Аджиев, Д.Д. Кулиев // ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА. – 2018. – . – Т. 54, № 4. – С. 437-445.
34. Алехин, С.Г. Двумерная модель аппроксиманта корреляционных функций анизотропных полей параметров атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, том 50. - №6. - 2014 - С. 1-7.
35. Алехина Н.М., Горбатенко В.П. Измерения грозовой активности над Западной Сибирью. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4. Природно-климатические изменения. Томск: Раско, 2000. С. 83—109.
36. Ализаде А.А., Хыдыров Ф.Л., Аджиев А.Х., Богаченко Е.М. Результаты исследования радиолокационно-осциллографическим методом электромагнитных полей молниевых разрядов на Северном Кавказе // Труды 3-го Всесоюзного симпозиума. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 189—192.
37. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 41–48.
38. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. Нальчик, 2008. 257 с.

39. Бадахова Г.Х., Акопов Г.А. Вековой мониторинг грозовой активности в предгорной зоне Центрального Предкавказья // Теоретические и практические аспекты научной мысли в современном мире: Сб. статей международной научно-практической конференции в 4 частях. Оренбург, 2017. С. 25-29.
40. Бадахова Г.Х., Кнутас А.В. Ставропольский край: Современные климатические условия. – Ставрополь, 2007. – С45,132-150.
41. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л., 1978.
42. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
43. Базлова Т.А. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т.А. Базлова, Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев и др. - Л.: Гидрометеиздат, 2002. - 331 с.
44. Балбуцкий И.М., Брылёв Г.Б., Куликова Г.И. Зависимость высот верхних границ радиоэха конвективных и слоистообразных облаков от высоты уровня нулевой изотермы. Радиолокационная метеорология. -Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 42-46.
45. Банах В.А. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере / В.А. Банах, И.Н. Смалихо. - Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. - 304 С.
46. Барекова М.В., Инюхин В.С., Макитов В.С. Комплексные исследования интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью северного Кавказа//Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. 2015. С. 264-271
47. Барекова М.В., Инюхин В.С., Макитов В.С. Радиолокационная структура и динамика развития отдельных градовых ячеек//Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным

воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. 2015. С. 271-282

48. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1976. – 392 с.

49. Бархоткин В. А., Кочетков М. П. (2014). Построение базы нечетких правил для идентификации объектов по обучающей выборке ограниченного объема // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12. Ч. 2. С. 130–138.

50. Баттан Л. Дж. Радиолокационная метеорология. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 196 с.

51. Баттан Л.Д. Радиолокационная метеорология. / Л.Д. Баттан. - Л.: Гидрометеиздат, 1962. - 196 С.

52. Беленцова В.А., Федченко Л.М. О влиянии циркуляции и термодинамического состояния слоя тропосферы на локализацию и интенсивность конвективных процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. – 1979. Вып. 44. – С.48-59.

53. Беленцова В. А., Федченко Л. М. О влиянии рельефа Северного Кавказа на распределение опасных конвективных явлений погоды. — Труды ВГИ, 1986, вып. 65, с. 34— 51.

54. Березинский Н.А., Болгов Ю.В., Пашкевич М.Ю., Шаповалов А.В., Инюхин В.С., Солодовников С.В., Аксенов С.А., Пашкевич А.М. Оценка эффекта АВ на облака и облачные системы на основе прямых измерений и численного моделирования//Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР/ Под редакцией Х.М. Калова, В.Н. Стасенко, 2008. С. 400-408.

55. Берюлев Г. П., Мельничук Ю. В., Черников А. А. Автоматизированный радиолокационный комплекс для измерения атмосферных осадков // Тр. V Всес. совещ. по радиометеор. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – С. 127-133.
56. Бин Б., Даттон Дж. Радиометеорология. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 362 с.
57. Блохина В.И. Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие по дисциплине «Авиационные прогнозы» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://www.studmed.ru/blohina-vi-aviacionnye-prognozy-pogody\\_0e2f9f4572d.html](http://www.studmed.ru/blohina-vi-aviacionnye-prognozy-pogody_0e2f9f4572d.html).
58. Богданова Э. Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М. Временные измерения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936-2000 гг. – Метеорология и гидрология, 2010, № 10, с 78-89.
59. Богданова Э. Г. Исследование ветровой погрешности измерения осадков. — Труды ГГО, 1966, вып. 195, с. 40—62.
60. Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова. — Метеорология и гидрология, 2008, № 8, с. 87—102.
61. Богданова Э. Г., Голубев В. С., Ильин Б. М., Драгомилова И. В. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России. — Метеорология и гидрология, 2002, № 10, с. 68—93.
62. Богданова Э. Г., Ильин Б. М., Гаврилова С. Ю. Оценка влияния защищенности установки осадкомера на величину ветровой погрешности измерения осадков. — Метеорология и гидрология, 2006, № 10, с. 92—101.
63. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 230 с.
64. Брылёв Г.Б., Куликова Г. И. Характеристики гроз над территорией СССР по данным сети МРЛ// Радиолокационная метеорология. -Л.: Гидрометеиздат, 1988, – С. 18-24.

65. Брылёв Г.Б., Куликова Г.И., Завдовьев А.В., Линев А.Г. Статистические зависимости между высотами верхних границ конвективных облаков и интенсивностью выпадающих из них осадков. -В сб.: Радиолокационная метеорология. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. – С. 38-45.
66. Вельтищев Н.Ф., Корольков А.М. Мезомасштабный численный анализ осадков с использованием радиолокационных и станционных измерений. // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 7. С. 15-23.
67. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. - 564 с
68. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. - М., Росгидромет, 2017. - 121 с.
69. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М.: Росгидромет, ФГБУ «ЦАО», 2014. - 110 с.
70. Вылегжанин И.С. Результаты исследования модифицированного метода парных импульсов в метеорадиолокаторе / Труды XIII международной научно-практической конференции «СИЭТ-2012» - Одесса, 2012. - С. 156.
71. Вылегжанин И.С. Состояние и перспективы использования поляризационных измерений в метеорологической радиолокации / И.С. Вылегжанин, В.Ю. Жуков, А.В. Рыжков. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9. Том 2. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 263 - 270.
72. Гиндуллин Ф. А., Горбатенко В. П. О связи грозовой деятельности с некоторыми климатическими характеристиками на территории Томской области. — Труды ЗапСиб-НИГМИ, 1989, вып. 86, с. 132—135.

73. Голубев В. С. Изучение точности учета атмосферных осадков. — Труды ГГИ, 1969, вып. 76, с. 149—164.
74. Голубев В. С. Методика корректировки срочных и месячных величин атмосферных осадков и результаты ее проверки. — Труды ГГИ, 1973, вып. 207, с. 11—27.
75. Голубев В. С., Коновалов Д. А., Богданова Э. Г., Ильин Б. М. Полная модель корректировки осадкомерных данных; методика и алгоритм оценки систематических составляющих погрешности. — WMO, Instruments and Observing Methods, ЯероЛ Na 74, WMO/TD №. 1028, 2000, pp. 136—139.
76. Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А. Ю., Товмач Ю. В. Корректировка измерений осадков и оценка их качества по данным Валдайской гидрологической станции. — Метеорология и гидрология, 1999, № 1, с. 103—113.
77. Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А. Ю., Товмач Ю. В. Оценка погрешностей измерений атмосферных осадков Валдайской контрольной системой. — Метеорология и гидрология, 1997, № 7, с. 108—116.
78. Гораль Г.Г., Баркова М.В. Влияние рельефа на распределение и повторяемость градовых процессов в регионе Кавказа. // Труды ВГИ. — 1996. Вып. 89. — С.100-109.
79. Горбатенко В. П. Грозовая деятельность на территории СССР. — Труды ВНИИЭ. — 1964. Вып. 19. Т. 111, 57 с.
80. Горбатенко В. П. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью. — Метеорология и гидрология. 1999, № 12, с. 21—28.
81. Горбатенко В. П., Дульзон А. А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность. — География и природные ресурсы, 1977, № 2, с. 142—146.
82. Горелик А. Г., Смирнова Г. А. О связи водности и интенсивности осадков с радиолокационной отражаемостью метеобъекта при различных

параметрах распределения капель по размерам // Труды ЦАО. – 1963. – Вып. 48. – С. 98-105.

83. Горелик А.Г. Применение многоволновых доплеровских РЛС для ветрового зондирования атмосферы на разных высотах / А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец, Г.Г. Щукин // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции. - Муром: Изд.-полиграфический центр МИВлГУ, 2012. - С. 30-36.

84. Горелик А.Г. Пути развития зарубежной и отечественной доплеровской радиолокации / А.Г. Горелик - М.: Московская государственная академия приборостроения и информатики, 1995. - 21 С.

85. Горелик А.Г., Некоторые особенности применения многоволновых доплеровских радиолокационных станций для ветрового зондирования атмосферы / А.Г. Горелик С.Ф. Коломиец, Г.Г. Щукин // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2012. - № 186. - С. 32-37.

86. ГОСТ 24728-81 Ветер. Пространственное и временное распределение характеристик. - М., 1982. - 88 С.

87. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн И.М. Рыжик. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 1108 С.

88. Дадали Ю. А., Лившиц Е. М. Радиолокационные исследования трансформации параметров облаков при естественном развитии и при активных воздействиях на них // Тр. ВГИ. – 1985. – Вып. 59. – С. 104-112.

89. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.

90. Доплеровский лидарный профилометр для измерения параметров ветра / В.Р. Ахметьянов [и др.] // Измерительная техника. - 2013. - № 6. - С. 35-39.

91. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации, в 6-ти кн., ЦИВР.462414.002 РЭ, М.: ЛЭМЗ, 2011.

92. Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр [и др.] // Ученые записки РГГМУ. - 2011. - № 21. - С. 66-75.
93. Дорофеев Е. В., Львова М. В., Попов И. Б., Тарабукин И. А. Применение критериев распознавания грозовых кучево-дождевых облаков в алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации, получаемой с помощью метеорадиолокаторов нового типа. - Труды ГГО. 2014. Вып. 572, с. 140-153.
94. Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В. и др. Климатология. — Л., Гидрометеиздат, 1989, 568 с.
95. Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В. и др. Климатология. — Л., Гидрометеиздат, 1989, 568 с.
96. Дроздов О. А., Зубенок Л. И., Нечаев И. Н. Погрешности учета атмосферных осадков. — Труды ГГО, 1965, вып. 175, с. 24—30.
97. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. Пер. с англ. — М.: Изд-во «Мир», 1976. — 512 с.
98. Дульзон А.А., Гиндуллин Ф.А., Горбатенко В.П. и др. Исследование территориальной неоднородности характеристик грозовой деятельности // Труды 3-го Всесоюзного симпозиума. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 213—216.
99. Дядюченко В.Н., Вылегжанин И.С., Павлюков Ю.Б. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. 5 с.
100. Ершова Т.В., Горбатенко В.П. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям // Вестн. ТГПУ. 2011. Вып. 5 (107). С. 151—154.
101. 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 «КБНЦ РАН» д.т.н. профессора П.М. Иванова. С. 139-143.

102. Жарашуев М.В. Автоматическая статистическая оценка суточного хода числа градовых ячеек на Северном Кавказе. // Материалы X конференции молодых ученых. – Нальчик, 2009. - С. 114-118.
103. 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.
104. Жарашуев М.В. Измерение осадков с увеличенной площадью водосборника // Москва, Русский инженер, № 03(64). 2019. - С. 45-48.
105. Жарашуев М.В. Метод идентификации конвективных ячеек и результаты его применения для исследования градовых процессов: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00.30 / М.В. Жарашуев; ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». - Нальчик, 2010. -135 С.
106. Жарашуев М.В. Методика автоматизированного статистического анализа разрядов «облако-земля» для территории Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. – 2022 – № 4. – С. 111-117.
107. Жарашуев М.В. Программа автоматического статистического анализа мощных гроз на территории Северного Кавказа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020663445, 27.10.2020 г.
108. Жарашуев М.В. Программа автоматического формирования банка данных сети метеостанций // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661469, 07.09.2018 г.
109. Жарашуев М.В. Программа автоматической идентификации конвективных ячеек // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618059, 21.07.2017 г.
110. Жарашуев М.В. Программа автоматической обработки информации от грозопеленгаторов LS8000 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020663442, 27.10.2020 г.

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

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

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

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

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

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

117. Жарашуев М.В. Статистический анализ градовой активности Крыма и Ставропольского края // Метеорология и гидрология. – 2012 – № 7. – С. 28-36.

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

119. 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.
120. Жарашуев М.В. Статистический анализ радиолокационных характеристик мощных конвективных ячеек. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2010. – N2. – С60-67
121. Жарашуев М.В. Цикличность градовой активности на Северном Кавказе // Труды ГГО. Выпуск 598.- 2020. - С. 197-203.
122. 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
123. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Методика автоматической идентификации площадок засева градовых облаков. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2015. – N3. – С25-31
124. 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
125. 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. 2018. № 588. С. 139-149.
126. Жарашуев М.В., Макитов В.С., Кагермазов А.Х., Кулиев Д.Д. Метод калибровки локаторов сети штормооповещения // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. № 586. С. 164-174.

127. Жарашуев М.В., Программа автоматической калибровки локаторов сети штормооповещения // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662371, 07.11.2017 г.
128. 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.
129. 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.
130. 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.
131. Жарашуев М.В., Терекулов З.М., Акшайков 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.
132. 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.
133. Жуков, В.Ю. Современные проблемы метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. Т.61. –№ 10. – 2016.– С. 927–939.
134. Жуков, В.Ю. Щукин Г.Г. Новый параметр радиолокационного сигнала для распознавания опасных явлений погоды, связанных с ветром //

Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. Калининград.2021. С. 734-739.

135. Жуков, В.Ю. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология - 2014. - №2. - С. 92-100.

136. Извлечение метеоинформации на основе спектрального и корреляционного анализа отражений в импульсных доплеровских метеорологических РЛС / Б.М. Вовшин [и др.] // Прикладная радиоэлектроника, т. 6. - № 4. - 2007. - С. 491-510.

137. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией / А.М. Девяткин [и др.]. // Ученые записки РГГМУ. - 2013. - № 32. - С. 66-83.

138. Инюхин В.С., Макитов В.С., Суслов В.В. Сопоставительный анализ данных радиолокационных и наземных измерениях ливневых осадков// Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 1 (51). С. 52-60.

139. Инюхин В.С., Калов Х.М., Кущев С.А., Макитов В.С. Радиолокационные характеристики осадков при различных соотношениях града и дождя в зоне выпадения //Доклады Адыгской Международной Академии наук. 2014. Т. 16, №2. С. 109-115.

140. Инюхин В.С., Кущев С.А., Чередник Е.А., Макитов В.С. Динамические характеристики отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа по данным радиолокационных наблюдений // Труды ВГИ. Вып. 99. С. 41–51.

141. Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности / А.Х. Аджиев [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2015. - № 12 (173). - С. 182-193.

142. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. - 2016. - № 9. - С. 27-40.
143. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. - 2017. - № 6. - С. 31-45.
144. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака / А.Х. Аджиев [и др.] // Метеорология и гидрология. - 2017. - № 8. - С. 18-2
145. 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.
146. 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.
147. Канарейкин, Д.Б. Об оптимальной обработке радиолокационных сигналов в присутствии помех с учетом их поляризации. / В.Д. Канарейкин, В.А. Потехин. // Тр. VIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - Ашхабад, 1967. - С. 145-154.
148. Канарейкин, Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин - М.: Сов. радио. - 1966. - 238 С.
149. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю. Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. №45. С. 119—131.
150. Когерентный метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета / М.Т. Абшаев [и др.]. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное

исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 212 - 219.

151. Козаков К.К. Погода и Климат [Электронный ресурс] / К.К. Козаков. - Режим доступа: <http://pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 15.03.2015).

152. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Васильев А.Е. Характеристики грозовых очагов по инструментальным наблюдениям в Якутии в 1993—2001 гг. // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С 39—45.

153. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Лаптев А.Д. и др. Грозовая активность в Якутии по наблюдениям с помощью однопунктового грозопеленгатора — дальномера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. № 2. С. 105—109.

154. Колоколов В. П., Баркалова К. Н. Число грозовых разрядов и продолжительность гроз. — Труды ГГО, 1967, вып. 204, с. 56—59.

155. Колоколов В.П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 1969. № 11. С. 47—55.

156. Кондратюк В.И. Модернизация метеорологической сети Росгидромета. — Труды ГГО. 2011. Вып.564. С. 19-39.

157. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы места определения грозовых очагов. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 222 с.

158. Краус Т.В., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д. Исследование развития сверхмощного кучево-дождевого облака (провинция Андхра Прадеш, Индия, 28 сентября 2004 г.) // Метеорол. и гидрол. 2007. № 1. С. 30-42.

159. Краус Т.В., Шоу В., Синькевич А.А., Макитов В.С. Воздействия на облака в Индии, физическая и статистическая оценка результатов//Метеорология и гидрология, 2006. № 7. С. 24-33.

160. Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики - атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. /Г.В. Куповых, В.Н. Шулейкин, Г.Г. Щукин. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2015. - 206 С.

161. Лиев К.Б., Малкаров А.С. Сопоставление радиолокационных и наземных измерений осадков по результатам 2010 года в горных районах Кабардино-Балкарии//Известия вузов Северо-Кавказский регион. Естественные Науки. 2011. №6. С. 36-40.
162. Литвинов В.И. Основные конструкции плювиографов. «Осадки в атмосфере и на поверхности земли». 1980 г.
163. Лыдзер П.С. Полупроводниковые грозорегистраторы // Труды ГГО. 1964. Вып. 157. С. 54–58.
164. Макитов В.С., Инюхин В.С., Жарашуев М.В. 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.
165. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. / Л.Т. Матвеев - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 640 С.
166. Мельник Ю.А. Возможности использования одиночного доплеровского радиолокатора в метеорологических целях (обзор) / Ю.А. Мельник, В.М. Мельников, А.В. Рыжков // Труды ГГО. - Выпуск 538. - 1991. - С.8-18.
167. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. / В.М. Мельников. // // Зарубежная радиоэлектроника. - 1993. - №4. - С. 35-42.
168. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т.А. Базлова, Н.Б. Бочарников, Г.Б. Брылев, и др. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
169. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора / Д.А. Денисенков [и др.]. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2016. - № 3 (23). - С. 68-73.
170. Методические указания по использованию радиолокационных данных в синоптическом анализе и краткосрочном прогнозе погоды. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 8 с.

171. Методические указания. Устранение неоднородности между рядами дождемерных и осадкомерных наблюдений. — Л., Гидрометеиздат, 1964, 25 с.
172. Методы климатической обработки метеорологических наблюдений. /Под ред. О. А. Дроздова. — Л., Гидрометеиздат, 1957, 492 с.
173. Мещерская А. В., Ильин Б. М., Богданова Э. Г. и др. Анализ скорректированных рядов осадков на водосборе рек Волги и Урала за 1961—1990 гг. — Метеорология и гидрология, 2004, № 7, с. 46—63.
174. Мещерская А. В., Маргасова В. Г., Образцова М. З., Григор О. Ю. Снижение антициклоничности (рост циклоничности) на севере Евразии в связи с глобальным потеплением климата. — Известия РАН, сер. географ., 2001, № 6, с. 15—24.
175. Михайловский Ю. П. Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков. - Труды ГГО. 2015. Вып. 577, с. 197-211.
176. Михайловский Ю.П. О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 125—138.
177. Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. №595. С. 83—105.
178. Мнацеканов Р.А. Особенности орнитологической обстановки на Краснодарском аэродроме и безопасность полётов воздушных судов / Р. А. Мнацеканов, П. А. Тильба, // Материалы Второй Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Проблемы авиационной орнитологии» — М.: ИПЭЭ РАН. - 2012. - С. 54-56.
179. Муллаяров В.А., Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р. Особенности пространственного распределения положительных грозовых разрядов на Востоке Сибири // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 47—55.

180. Основные направления модернизации малогабаритного доплеровского метеорологического радиолокатора / И.В. Гончаров [и др.]. // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». - Выпуск 9, Том 2. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 378-385.
181. Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов, утвержденные Приказом Росгидромета от 21.05.2004 № 95.
182. Особенности построения и метеорологическая эффективность радиолокатора градозащиты и штормоповещения МРЛ-5 / Абшаев М.Т., Бурдаков Ф.И., Ваксенбург С.И. и др. // Труды IV Всес. совещ. по радиометеор. – Москва, 1984. – С. 168-174.
183. Отчет по теме 1.2.5 (раздел 6) Плана НИОКР Росгидромета на 2007 год «Разработка методических рекомендаций по применению автоматического бесконтактного осадкомера (АБО) «Капля», с учетом результатов его опытной эксплуатации», 2007.
184. Павлюков Ю.Б. К вопросу о создании системы валидации данных сети ДМРЛ Росгидромета. / Ю.Б. Павлюков, Н.И. Серебряник // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное зондирование природных сред», т.2. - Санкт-Петербург, 2013. - С.291-297.
185. Патент РФ № 2008111561/28, 25.03.2008. Автоматизированная радиолокационная система штормоповещения и активных воздействий на облака / Патент России № 2395819. 2010. Бюл. №21/ Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Жарашуев М В. [и др.].
186. Патент РФ № 2018136016, 11.10.2018. Плювиограф для измерения атмосферных осадков / Патент России № 2694274. 2019. Бюл. №20/ Байсиев Х.-М. Х., Жарашуев М В.
187. Перспективные ДМРЛ со сжатием широкополосных сигналов / Б.М. Вовшин [и др.] // Материалы IV Всероссийской научной конференции

«Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». - СПб., 2016. - С. 56-61.

188. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов/ Б.М. Вовшин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. - №10. - 2009. - С.15-25.

189. Потехин В.А. О выборе поляризационных параметров антенн с учетом статистических характеристик канала связи. / В.А. Потехин, И.З. Климов. // Тр. ЛВИКА им. А.Ф. Можайского. - 1968. - №542. С. 54-62.

190. Применение радиолокационных методов для метеобеспечения авиации ВМФ / А.Е. Дроздов [и др.]. // Навигация и гидрография. - 2015. - №41. - С. 59-67.

191. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-СМ. (шифр «ГИМЕТ- 2010). Описание программы, 623.02572456.01001-01 13 01, 2011, 108с

192. Просветов Г. И. Эконометрика. Задачи и решения (учебно-методическое пособие). — М., РДЛ, 2005, 104 с.

193. Профет Д.Т. Проблемы искусственного воздействия на град и достижения в этой области. Динамика кучевых облаков. – М.: Мир, 1964. – С. 244 261.

194. Пушков, А.А. Статистическое оценивание энергетических и доплеровских характеристик отражений от метеообъектов при их импульсном зондировании: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.03 / Александр Александрович Пушков ; Московский технологический университет МИРЭА. - М., 2016. - 118 л.

195. Радиолокационная метеорологическая информация в аэронавигации. / Т.А. Базлова [и др.]. СПб: РГГМУ, 2014. -364 С.

196. Радиолокационные измерения осадков / Боровиков А.М., Костарев В.В., Мазин И.П., и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 140 с.

197. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / Д.А. Денисенков [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2016. - № 12/2. - С. 15-19.
198. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Т.2: Вопросы практического применения радиолокационной метеорологической информации. / Т.А. Базлова [и др.]. - СПб.: Наука, 2010. - 518 С.
199. Радиолокационный метод исследования пространственной структуры турбулентности в облаках и осадках / А.А. Иванов [и др.] // Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Под ред. А.А. Черникова. - М.: Гидрометеиздат, 1978. - С. 37-40.
200. Радиотеплолокация в метеорологии / Л.П. Бобылев [и др.] - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 283С.
201. Развитие метода пассивно-активной радиолокации для задач штормооповещения / И.С. Вылегжанин [и др.] // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. - 2016. - №2 (653). - С. 146-150.
202. Разработка метеорологического пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С / В.Ю. Жуков [и др.] // V Всероссийские Арmandовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы V Всероссийской научной конференции. - Муром, 2015. - С. 58-66.
203. Раков, В.И. Методы аппроксимация диаграмм направленности радиолокационных станций / В.И. Раков - Л: ВМАКВ, 1958. - 59 С.
204. РД 52.11.332.93. Методические указания. Методика выполнения радиолокационных наблюдений с помощью комплексов АКСОПРИ. Вторая редакция / Ю.В. Мельничук, В.Н. Губарчук, Н.И. Серебрянник. – М.: 1997.– 68 с.
205. Рефракция и ее непосредственное значение в стрельбе / С. С. Лопатина — Электрон. дан. — М.: Некоммерческий Интернет сервер «ADA WEB SITE», 2005. — Режим доступа

<http://www.ada.ru/guns/ballistic/refraction/index.htm> свободный. — Загл. с экрана.

206. Руководство ВМО по формам с табличным поиском: FM 94 BUFR и FM 95 CREX. – Женева, 01.07.2002.

207. Руководство по аэропортовым службам. Часть 3 Создаваемая дикой природой опасность и методы ее уменьшения. Doc 9137 - AN 898. // Международная организация гражданской авиации. - 2012 г.

208. Руководство по метеорологическим и методам наблюдений (1996). — ВМО-№8 Шестое издание. Часть I. Глава 6. — Женева.

209. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системе градозащиты / Абшаев М. Т., Бурцев И. И., Ваксенбург С. И., Шевела Г. Ф. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 230 с.

210. Руководящий документ РД 52.37.731-2010. Организация и проведение противоголовоградной защиты / Абшаев М.Т., Абшаев А.М., — Нальчик, 2010 – 30 – 83 с.

211. Седунов Ю. С. Активные воздействия на метеорологические процессы в интересах народного хозяйства // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 9. – С. 5-17.

212. Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А. Коронный разряд в облаках. - Радиофизика, 2014, т. LVI, № 11-12, с. 1-12.

213. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов. - Метеорология и гидрология, 2016, № 9, с. 27-40.

214. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю. и др. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорология и гидрология. 2019. №6. С. 37—51.

215. Синькевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А. и др. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков // Метеорология и гидрология. 2018. №8. С. 19—32.
216. Системы междупериодной обработки сигналов на фоне гауссовых пассивных помех в импульсных РЛС (теория, структуры, потенциальная и реальная эффективность) / С.И. Бурковский [и др.] // Сборник научных трудов 2- го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ - 2005), т. 2. - Харьков, 2005. - С. 20 - 23.
217. Снегуров А. В. Опыт построения экспериментальной грозопеленгационной сети // Труды ГГО. 2010. Вып. 562. С. 190–200.
218. Снегуров А. В. Экспериментальная оценка эффективности сети пеленгации гроз //Труды ГГО.2010. Вып. 562. С. 201–210.
219. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Экспериментальные исследования погрешности измерений широкополосными грозопеленгаторами // Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 42–81.
220. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Сравнение характеристик многопунктовых грозопеленгационных систем // Труды ГГО. 2019. Вып. 595. С. 22–62.
221. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Экспериментальная грозопеленгационная система // Труды ГГО., 2012. Вып. 567. С. 188–200.
222. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Система местоопределения гроз. - Труды ГГО. 2017. вып. 586, с. 117-140.
223. Совместные радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков / А.Е. Башаринов [и др.] // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океанат, т.6. - №5 - 1970 - С.526-530.430-443
224. Современная радиолокация (анализ, расчеты, проектирование систем). Пер. с англ. – М.: Изд-во Советское радио, 1969. – 704 с.
225. Состояние и перспективы развертывания сети ДМРЛ-С Росгидромета / А.С. Азаров [и др.] // Инновационные методы и средства исследований в

области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата. Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы - Ставрополь: Изд-во СКФУ. - 2013. - С. 310-312.

226. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 204 с.

227. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богдано-ва Э. Г. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков. —Метеорология и гидрология, 1965, № 10, с. 50—54.

228. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богданова Э. Г., Федорова Е. А. Методика кор-ректировки многолетних норм осадков. — Метеорология и гидрология, 1965, № 11, с. 43—50.

229. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации. / Б.М. Вовшин [и др.]. // II Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции - Муром, 2012. - С. 49-54.

230. Техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка доплеровского метеорологического радиолокатора диапазона 5,3 см». Шифр ДМРЛ-С, 2008.

231. Технологии сверхкороткоимпульсной радиолокации природных сред с высоким разрешением по дальности / В.А. Сарычев [и др.] // Метеорологический вестник. - 2016. - № 3 (8). - С. 17-22.

232. Толмачева Н.И. Использование радиолокационной и спутниковой информации для анализа и прогноза суточных сумм осадков. — Географический вестник, 2006, №1(3), с. 108-116.

233. Федорова Е. А. Учет степени защищенности станций при вычислении скорости ветра на уровне установки осадкомера. — Труды ГГО, 1966, вып. 195, с. 63—69.

234. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 424 с.
235. Федченко Л.М., Залиханов М.Ч. Состояние и перспективы научных работ по предотвращению града // Тр. ВГИ. 1984. Вып. 55. С. 3–24.
236. Филиппов А.Х. Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидро-метеиздат, 1974. 75 с.
237. Черников А. А. Радиолокационные отражения от ясного неба / А.А. Черников. - Л.: Гидрометеиздат. - 1979.- 48 С.
238. Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Березинский И.Н., Пашкевич М.Ю., Березинский Н.А. Программно-аппаратные средства для оценки влияния гидрометеоров в вершинной части облаков на прохождение лазерного излучения в их диапазоне для авиационных и космических приложений//Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 19. С. 125-131.
239. Шаповалов В. А. Комплексный анализ данных радиолокационной и грозопеленгационной сети/ В.А. Шаповалов, А.М. беккиев, З.Х. Гучаева, А.А. Насонов, Е.А. Ковалев / Перспективы науки.- 2018-. №12(111). –С. 63-68.
240. Швер Ц. А. Атмосферные осадки на территории СССР. — Л., Гидрометеиздат, 1976, 302 с.
241. Швер Ц. А. Исследование результатов наблюдений по дождемеру и осадкомеру. — Л., Гидрометеиздат, 1965, 170 с.
242. Щербань М. И. Микроклиматология. — Киев, Вища школа, 1985, 224 с.
243. Щукин Г.Г., Караваев Д.М. Разработка критерия развития облаков и осадков с использованием радиотеплолокационных данных и радиолокационной информации // Труды ГГО. 2008. Вып. 557. С. 119—132.
244. Abshaev M. T. A New Concept of hailstorm Modification // Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Paestum, Italy, 1994. – Vol. 1. – P. 139-142.

245. Abshaev M.T. Efficiency of Russian hail suppression technology in different regions of the World // Seventh WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Chiang Mai, Thailand, 1999. – Vol. 2. – P. 411-414.
246. Abshaev M.T. Evolution of seeded and non-seeded hailstorms // Seventh WMO Sci. Conf. On Wea. Mod. – Chiang Mai, Thailand, 1999. – Vol. 2. – P. 407-410.
247. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Jarashuev M.V. at all. New means of hail suppression // 9th WMO Conf. Weather Mod. – Antalya, Turkey, 2007.
248. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Gekkieva J.M., Adzhiev A.H. Interlink between lightning activity of hailstorms and their radar characteristics // Journal of Physics: Conferenct Series. 8. Cep. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity», 2020, pp. 138-146. C.012010
249. Adzhiev A.Kh., Kумыков Kh.K. // Lightning and mountains: Proc. Intern. Conf. France, 1997. P. 78.
250. Anderson R.B. // IEE proceedings. 1984. Vol. 131. Pt. A. № 2. P. 118-124.
251. Atlas, D., 1990: Radar in Meteorology. Battan memorial and 40-th Anniversary Radar Meteorology conference Met. Soc. Boston.
252. Badakhova G.Kh., Akopov G. A. Secular monitoring of thunderstorm activity in the foothill zone of the Central Ciscaucasia //Theoretical and practical aspects of scientific thought in the modern world: Sat. articles of the international scientific and practical conference in 4 parts. Orenburg, 2017.S. 25-29.
253. Ballarotti M.G., Saba M.M.F., Pinto Jr.O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecondscale // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L23802. doi:10.1029/2005GL023 889.
254. Bech, J. Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications. / J. Bech, J. L. Chau (EdS.). - Rijeka, Croatia: InTech, 2012. - 482 p.
255. Bell T.F., Reising S.C., Inan U.S. Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with red sprites // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 8. P. 1285—1288.

256. Bera Sudarsan. Observations of monsoon convective cloud microphysics over India and role of entrainment-mixing // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121.
257. Boccippio D.J., Cummins K.L., Christian H.J., Goodman S.J. Combined Satellite- and Surface-Based Estimation of the Intracloud—Cloud-to-Ground Lightning Ratio over the Continental United States // Mon. Weather Rev. 2001. V. 129. P. 108—122.
258. Browning K.A. and Ludlam F.H. Airflow in convective storms. // Quart. J. Roy. Met. Soc. – 1962. – Vol. 88. – P. 117-135.
259. Campbell D.B., Black G.J., Carter L.M., Ostro S.J. Radar evidence for liquid surfaces on TITAN // Science. 2003. T. 302. № 5644. C. 431.
260. Carey L. D. and Rutledge S. T. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: AC-band polarimetric radar study. - Mon. Wea. Rev., 2000, vol. 128, No. 8, pp. 2687-2710.
261. Carey L.D., Rutledge S.T. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: AC-band polarimetric radar study // Mon. Weath. Rev. 2000. Vol. 128, №8. P. 2687—2710.
262. Chan, P. W. Performance of eddy dissipation rate estimates from wind profilers in turbulence detection / P.W. Chan, S.T. Chan // 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, 2004. - p. 37-41.
263. Chan, P. W. Use of spectrum width data from the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) for monitoring turbulence intensity: case studies / P.W. Chan, C.M. Li, K.H. Wong // First Asian Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2007. - p. 56-67
264. Chan, P.W. Aviation Applications of Doppler Radars in the Alerting of Windshear and Turbulence. Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications. / P.W. Chan, P. Zhang.

265. Chan, P.W. Aviation Applications of the Pulsed Doppler LIDAR - Experience in Hong Kong. / P.W Chan // The Open Atmospheric Science Journal - №3
266. Dessens J. Hail in South Western France: Results of a 30-year hail prevention Project with AgI seeding from the ground // J. Climate Apl. Met. – 1986. – Vol. 25. – P. 48-58.
267. Devendraa Siingh, Buchunde P.S., Singh R.P. et al. Lightning and convective rain study in different parts of India // Atmospheric Research. 2014. Vol. 137. P. 35—48.
268. Diendofer G., Schulz W., Rakov V.A. Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning locating system // IEEE transactions on electromagnetic compatibility. 1998. V. 40. № 4. P. 452—464.
269. Dissipation Rates in Thunderstorms Estimated by Doppler Radar in Relation to Aircraft In Situ Measurements. / R. Baumann [and al.] // Journal of atmospheric and oceanic technology, V.18. - 2001. - p. 1609-1627.
270. Doviak R. J., and, 2006: Doppler radar and weather observations. / R.J. Doviak, D.S. Zrnic - Dover Publications Inc., Mineola, New York, 2006 - 562 p.
271. Elachi C., Wall S., Anderson Y., Boehmer R., et al. Cassini radar views the surface of TITAN // Science. 2005. Vol. 308. № 5724. P. 970-974.
272. Evaristo R., Bals-Elsholz T., Williams E., Fenn A. J., Donovan M., and Smalley D. Relationship of graupel shape to differential reflectivity: Theory and observations. /In: Proceedings of 29th Conference on Environmental Information Processing Technologies. - American Meteorological Society, 2013, 14, 9 p.
273. Farnell C., Rigo T., Pineda N. Exploring radar and lightning variables associated with the Lightning Jump. Can we predict the size of the hail? // Atmospheric Research. 2018. Vol. 202. P. 175—186.
274. Groisman P. Ya. et al. Contemporary climate changes in high latitudes of the North-ern Hemisphere: Daily time resolution. /In: Preprints, 14th Symp. on

Global Change and Climate Variations. — Long Beach, CA, Amer. Meteorol. Soc., 2003, CD-ROM, 4.8.

275. Hogan R.J. A variational scheme for retrieving rainfall rate and hail reflectivity fraction from polarization radar // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2007. T. 46. № 10. C. 1544-1564.

276. Holler H., Meischner P.F. Multiparameter Radar investigation of hailstorms and operational storm seeding in Southern Germany // *Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif.* – Paestum, Italy, 1994. – Vol. 1. – P. 47-50.

277. Inyukhin V.S., Kushchev S.A., Liev K.B. Radar studies of the distribution of the formation zones of the first radar echo of hail clouds//*Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. T. 52, № 6. P. 615-621.

278. Kerr D.E. *Propagation of Short Radiowaves*. Dover Publications Inc. 1951.

279. Knight C.A. and Squires P. Hailstorms of the Central High Plains // *The Nat. Hail Research Experiment*. – Colorado, Boulder, 1982. – Vol. 2. – P. 302.

280. Krauss Terry W. Radar Characteristics of Seeded and Non-Seeded Hailstorms in Alberta, Canada // *Seventh WMO Sci. Conf. On Weather Modif.* – Chiang Mai, Thailand, 1999. – Vol. 2. – P. 415-418.

281. Liu C., Cecil D. J., Zipser E. J. et al. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. №D06.

282. Liu C., Cecil D. J., Zipser E. J., Kronfeld K., and Robertson R. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics. - *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, No. D06, 19 p.

283. Lyons W.A., Uliasz M., Nelson T.E. Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the summer months in the contiguous united states. *American Meteorological Society // Monthly weather review*. 1998. V. 126. P. 2217—2233.

284. M. Fang, R. Doviak, V. Melnikov. Spectrum Width Measured by WSR-88D: Error Sources and Statistics of Various Weather Phenomena. Journal of atmospheric and oceanic technology. V.21, June 2004, p.888-904.
285. Makitov V.S., Inyukhin V.S., Kalov H.M., Kalov R.H. Radar research of hailstorm formation and development over the central part of Northern Caucasus (Russia). organization and main results of the regional hail suppression projects//Natural Hazards, 2017. P. 253-272.
286. Marshal J.M., Peterson A.M., Barnes A.A., 1972: Combined radar acoustic sounding system - Appl. Opt., 2, № 1, 108-112.
287. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I-III. // J. Appl. Met. – 1972. – Vol. 11, No 1. – P. 166-201.
288. Muhleman D.O., Grossman A.W. Radar reflectivity of TITAN // Science. 1990- Vol. 248. - P. 975-980.
289. Nalbandian O.G., 1977: For the theory of radio-acoustic sounding of the atmosphere. Iz. Ak. Nauk USSR. Physics of Atm. And Oc., 13, № 3, P. 245-253.
290. NEXRAD Detection of Hazardous Turbulence. 44th AIAA / G. Blackburn [and al.] //Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2006-0076. - Reno, Nevada, 2006. - 16 p.
291. On hail detection at the ground / Fraile R., Castro A., Marcos J.L., Vega A., Sanchez J.L. // Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Paestum, Italy, 1994. – Vol. 1. – P. 201-204.
292. Patra S., Kalapureddy M. Cloud microphysical profile differences pertinent to monsoon phases: inferences from a cloud radar // Meteorol. Atmos. Phys. 2019.
293. Petrov R., Dimitrov Ch., Slavov K. Automated Radar System for a convective cloud seeding Project // Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Paestum, Italy, 1994. – Vol. 1. – P. 451-454.
294. Prabha T.V., Khain A., Maheshkumar R.S., Pandithurai G., Kulkarni J.R., Konwar M., Goswami B.N. Microphysics of premonsoon and monsoon clouds as seen from in situ measurements during the cloud aerosol interaction and

precipitation enhancement experiment (CAIPEEX) // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 1882-1901.

295. Prospects of the WSR-88D Radar for Cloud Studies. / V.M. Melnikov [et al.]. // Journal of applied meteorology and climatology. - 2011. - V. 90. - P. 859-872.

296. R. W. Klebesadel, W. Doyle Evans, E. E. Fenimore, J. G. Laros, and J. Terrell, Time-of-arrival location technique, Los Alamos Science, vol. 3, pp. 10–23, 1982.

297. R. J. Trapp and C. A. Doswell, “Radar data objective analysis,” J. Atmos. Ocean. Tech., vol. 17, pp. 105–120, 2000.

298. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge: University Press, 2003. 687 p.

299. Rakov V.A., Uman M.A., Thottappillil R. Review of lightning properties from electric field and TV observations // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № D5. P. 10,745— 10,750.

300. Report No. 1 of the Meeting of Experts on the Present Status of hail suppression // WMO. Weather Modification Programme. Hail Suppression Research. – Geneva, December, 1977. – 24 p.

301. Report No. 2 of the Meeting of Experts on the detection and measurement of hail // WMO. Weather Modification Programme. Hail Suppression Research. – Nalchik, USSR, November, 1979. – 29 p.

302. Report No. 3 of the Meeting of Experts on the Dynamics of Hailstorms and related uncertainties of Hail Suppression // WMO. Weather Modification Programme. Hail Suppression Research. – Geneva, February, 1981. – 30 p.

303. Report of the Meeting of experts to review the present status of hail suppression // WMO. Weather Modif. Program. Hail Suppression Research. – Golden Gate National Park, South Africa, 6-10 November 1995. – WMP No. 26. – 40 p.

304. Rodger C.J., Werner S., Brundell J.B., Lay E.H. et al. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study // *Ann. Geophys.* — 2006. — V. 24.
305. Rogers, R.R. *The Early Years of Doppler Radars in Meteorology.* /R.R. Rogers - Boston, 1991. - 176 p.
306. Ryzhkov, A.V. Depolarization in Ice Crystals and Its Effect on Radar Polarimetric Measurements / A.V. Ryzhkov, D.S. Zrnic. // *Journal of atmospheric and oceanic technology*, v.24 - 2007. - p. 1256-1267.
307. Saba M.M.F., Ballarotti M.G., Pinto Jr.O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D03101. doi:10.1029/2005JD006415.
308. Saraiva A.C.V., Saba M.M.F., Pinto Jr.O. et al. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in Sao Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations // *J. Geophys. Res.* 2010. V 115. № D11102. doi:10.1029/ 2009JD012604.
309. Senov H.M., Abutalipov R.N., Bolgov Yu.V. Building a Digital Elevation Model of Territory of Kabardino-Balkarian Republic on Radar Interferometric Shooting. 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). Proceedings. M.: Фонд «Качество», 2016. p. 14-16.
310. Serafin, R.J. Jhtrational weather radar in the USA: progress and opportunity / R.J. Serafin, J.W. Wilson // *COST 75*, 1999 - P.35-61.
311. Sevruk B. and Michaeli J. WMO questionnaire on recording precipitation gauges: state-of-the-art. — *Water Sci. Techn.*, 2002, vol. 45, No. 2, pp. 139—145.
312. Sevruk B. Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. *Operational Hydrology*, Rep. No. 21.—Geneva, WMO, WMO Rep. No. 589, 1982, 91 p.
313. Some results from the North Dakota thunderstorm Project / Smith P.L., Boe B.A., Brown R.A., DeMott P.J., Klimowski B.A., Martner B.E., Orville H.D.,

Reinking R.F., Stith J.L. // Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Paestum, Italy, 1994. – Vol. 1. – P. 93-96.

314. Stumpf G.J. Smith T.M. Thomas C. The national severe storms laboratory's contribution to severe weather warning improvement: multiple-sensor severe weather applications // Atmospheric research - 2003- Vol.67. -P. 657-669.

315. Suda T. et al. // Proceedings of the 25th International conference on lightning protection. Rhodes, Greece, 2000. Vol. A. P. 206-211.

316. Vivekanandan J., Zhang G., Ellis S.M., Rajopadhyaya D., Avery S.K. Radar reflectivity calibration using differential propagation phase measurement// Radio Science. 2003. Vol. 38. № 3 pp. 45-47.

317. Zharashuev M.V. Statistical analysis of hail activity in Stavropol krai and Crimea // Russian Meteorology and Hydrology, №7. 2012.

Приложение 1

	Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Wind Speed	Wind Dir	Hi Dir	Bar	Rain	Hum. Rain		Rain Rate
№												
1	15.08.2017	6:44	19,3	19,3	4,8	W	WSW	707,4	0,2	2,6		0
	15.08.2017	6:59	19,2	19,2	0	---	---	707,7	0,2			0,8
	15.08.2017	7:05	19	19	4,8	SSW	SSW	707,8	0,2			2
	15.08.2017	7:09	18,9	18,9	3,2	SW	SW	707,9	0,2			2,8
	15.08.2017	7:16	18,8	18,8	6,4	WSW	WSW	708	0,2			1,8
	15.08.2017	7:20	18,8	18,8	6,4	WSW	WSW	708	0,2			3,2
	15.08.2017	7:24	18,7	18,7	4,8	WSW	WSW	708	0,2			3
	15.08.2017	7:27	18,7	18,7	3,2	WSW	WSW	708,1	0,2			3,8
	15.08.2017	7:32	18,7	18,7	1,6	WSW	WSW	708,1	0,2			2,6
	15.08.2017	7:37	18,7	18,7	1,6	WSW	WSW	708,1	0,2			2,4
	15.08.2017	7:45	18,4	18,5	0	WSW	WSW	708,2	0,2			1,6
	15.08.2017	7:57	18,3	18,3	4,8	WSW	WSW	708,2	0,2			1
	15.08.2017	8:24	18,5	18,5	0	SW	SW	708,4	0,2			0
2	17.08.2017	19:39	24,1	24,1	3,2	SW	SW	706,8	0,2	0,6		0
	17.08.2017	20:28	22,3	22,3	6,4	NW	NNW	707,1	0,2			0
	17.08.2017	20:31	22,1	22,1	3,2	NNW	NNW	707,1	0,2			4,2
	17.08.2017	21:22	21	21	3,2	WSW	WSW	707,4	0,2			0
	17.08.2017	21:28	20,8	20,8	4,8	WSW	WSW	707,4	0,2			2,2
	17.08.2017	21:31	20,8	20,8	1,6	SW	SW	707,4	0,2			4,4
	17.08.2017	21:33	20,7	20,8	1,6	SW	SW	707,3	0,2			4,8
	17.08.2017	21:36	20,7	20,7	8	WSW	WSW	707,3	0,2			4,8
	17.08.2017	21:39	20,6	20,7	6,4	WSW	W	707,4	0,2			4,4
	17.08.2017	21:40	20,6	20,6	1,6	WSW	WSW	707,4	0,2			9,2

3	17.08.2017	21:43	20,6	20,6	4,8	W	W	707,4	0,2	16		5,2
	17.08.2017	22:00	20,3	20,4	0	---	---	707,4	0,2			0,8
	17.08.2017	23:03	20,2	20,2	0	W	W	707,3	0,2			0
	17.08.2017	23:08	20,2	20,2	0	W	W	707,3	0,2			2,2
	17.08.2017	23:21	20,1	20,1	4,8	S	SW	707,2	0,2			1
	17.08.2017	23:24	20,1	20,1	4,8	S	SSW	707,3	0,2			4,6
	17.08.2017	23:25	20,1	20,1	9,7	S	S	707,3	0,4			53,6
	17.08.2017	23:26	20	20	11,3	SSW	S	707,3	1,2			107,6
	17.08.2017	23:27	20	20	8	SSW	S	707,3	0,8			107,6
	17.08.2017	23:28	19,9	20	8	SSW	S	707,2	0,8			86,6
	17.08.2017	23:29	19,9	19,9	8	S	SSW	707,2	0,6			64,8
	17.08.2017	23:43	19,8	19,8	1,6	WSW	WSW	707,3	0,2			3,4
	17.08.2017	23:47	19,7	19,7	0	W	W	707,2	0,2			3
	17.08.2017	23:54	19,6	19,7	0	---	---	707,2	0,2			2
	18.08.2017	0:01	19,6	19,6	0	---	---	707,2	0,2			1,8
	18.08.2017	0:03	19,6	19,6	0	---	---	707,2	0,2			9,8
	18.08.2017	0:06	19,6	19,6	0	W	W	707,1	0,2			3,8
	18.08.2017	0:17	19,6	19,6	1,6	SSW	SSW	707	0,2			1,2
	18.08.2017	0:23	19,6	19,6	1,6	SSW	SSW	706,9	0,2			2
	18.08.2017	0:33	19,6	19,6	0	---	---	706,8	0,2			1,2
	18.08.2017	0:58	19,6	19,6	0	---	---	706,8	0,2			0
	18.08.2017	1:05	19,6	19,6	0	---	---	706,8	0,2			1,8
	18.08.2017	1:12	19,6	19,6	0	ESE	ESE	706,8	0,4			13,4
	18.08.2017	1:13	19,6	19,6	0	ESE	ESE	706,8	0,2			13,4
	18.08.2017	1:14	19,6	19,6	0	ESE	ESE	706,8	0,2			19,8
	18.08.2017	1:15	19,6	19,6	0	ESE	ESE	706,8	0,4			17,2
	18.08.2017	1:17	19,6	19,6	3,2	NNE	NE	706,8	0,2			10,2

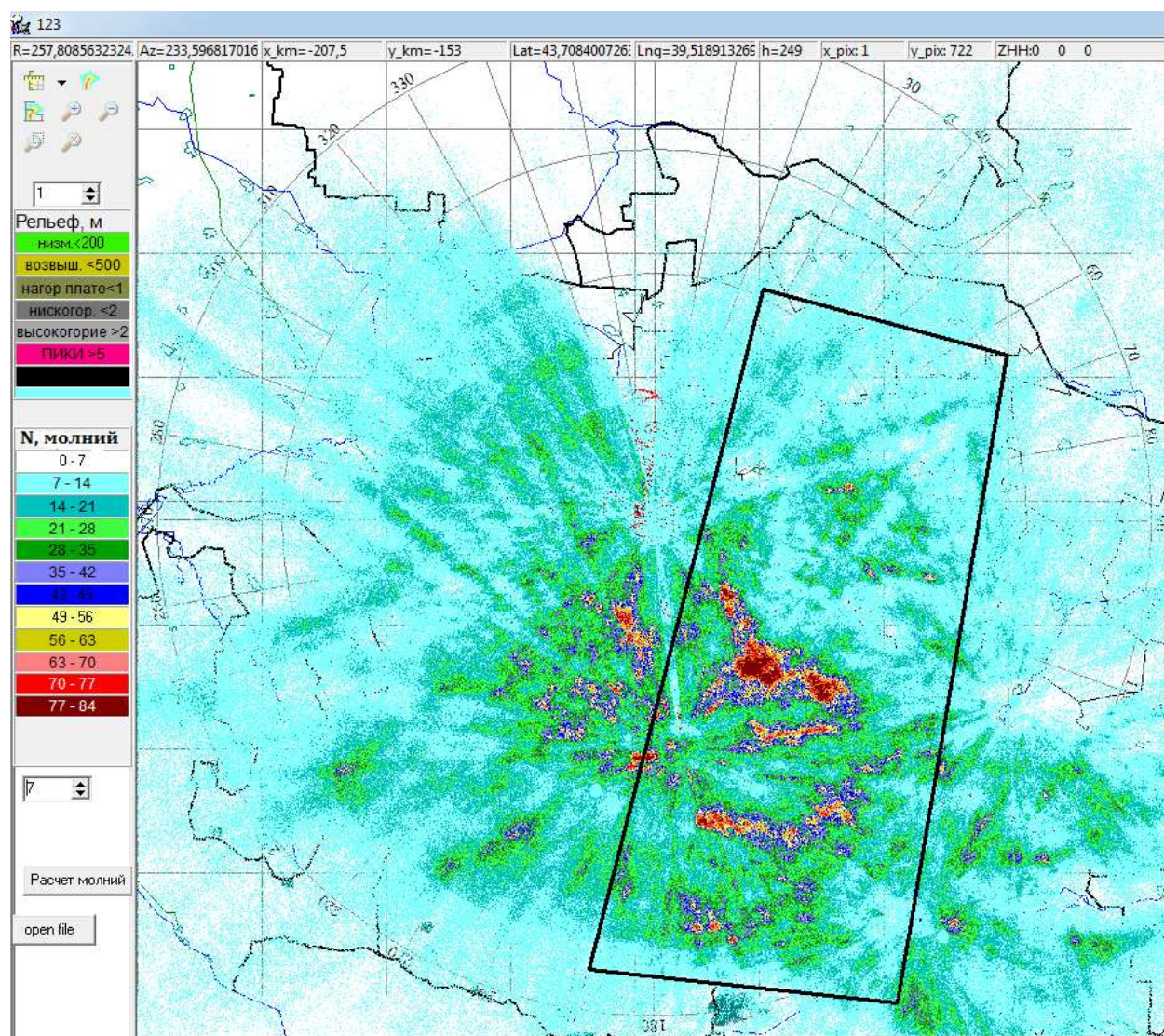
	18.08.2017	1:18	19,6	19,6	3,2	N	N	706,8	0,2		17,6
	18.08.2017	1:19	19,6	19,6	6,4	NNE	N	706,8	0,2		16,4
	18.08.2017	1:20	19,6	19,6	3,2	NE	NE	706,8	0,2		16,4
	18.08.2017	1:21	19,6	19,6	1,6	NNE	NNE	706,8	0,4		14,6
	18.08.2017	1:22	19,6	19,6	1,6	SE	E	706,8	0,2		18,8
	18.08.2017	1:23	19,6	19,6	0	N	N	706,8	0,4		18,8
	18.08.2017	1:25	19,5	19,5	1,6	N	NE	706,7	0,2		10,8
	18.08.2017	1:27	19,5	19,5	3,2	E	E	706,7	0,2		12,2
	18.08.2017	1:28	19,5	19,5	0	ENE	ESE	706,7	0,2		12,2
	18.08.2017	1:29	19,4	19,4	3,2	NE	NNE	706,7	0,2		11,8
	18.08.2017	1:30	19,4	19,4	1,6	NE	NE	706,7	0,2		11,4
	18.08.2017	1:33	19,4	19,4	4,8	NNE	NNE	706,6	0,2		4,2
	18.08.2017	1:34	19,4	19,4	4,8	NNE	NNE	706,6	0,2		11,4
	18.08.2017	1:37	19,3	19,3	4,8	NNE	N	706,6	0,2		5,4
	18.08.2017	1:40	19,3	19,3	6,4	NNE	NNE	706,6	0,2		4
	18.08.2017	1:42	19,3	19,3	6,4	NNE	NNE	706,6	0,2		5,4
	18.08.2017	1:46	19,2	19,2	4,8	NNE	N	706,6	0,2		3,8
	18.08.2017	1:50	19,1	19,1	6,4	NE	N	706,7	0,2		3
	18.08.2017	1:56	19,1	19,1	1,6	NNE	NNE	706,7	0,2		2,2
	18.08.2017	2:00	19	19	4,8	NE	NNE	706,6	0,2		3,8
	18.08.2017	2:02	18,9	18,9	4,8	NNE	NNE	706,6	0,2		4,4
	18.08.2017	2:09	18,8	18,8	0	---	---	706,7	0,2		1,8
	18.08.2017	2:19	18,8	18,8	0	E	E	706,7	0,2		1,2
	18.08.2017	2:30	18,7	18,7	0	---	---	706,6	0,2		1,2
	18.08.2017	2:31	18,7	18,7	0	---	---	706,6	0,2		7,4
	18.08.2017	2:38	18,6	18,6	3,2	N	NNE	706,6	0,2		2
	18.08.2017	2:47	18,4	18,4	0	NNE	NNE	706,6	0,2		1,4

	18.08.2017	3:01	18,1	18,1	0	NE	NE	706,6	0,2			0,8
4	18.08.2017	3:51	17,9	17,9	0	---	---	706,7	0,2	0,6		0
	18.08.2017	4:04	17,9	17,9	0	---	---	706,8	0,2			0,8
	18.08.2017	4:27	17,9	17,9	0	NNE	NNE	706,8	0,2			0
	18.08.2017	4:34	17,9	17,9	0	NNE	NNE	706,9	0,2			1,8
5	18.08.2017	4:35	17,9	17,9	1,6	NNE	NNE	706,9	0,2	3,8		13,8
	18.08.2017	4:36	17,9	17,9	1,6	NNE	NNE	706,9	0,2			11,8
	18.08.2017	4:37	17,8	17,8	0	NNE	NNE	706,9	0,2			24,6
	18.08.2017	4:38	17,8	17,8	1,6	NNE	NNE	706,9	0,4			25
	18.08.2017	4:39	17,8	17,8	0	---	---	706,9	0,2			18,4
	18.08.2017	4:51	17,7	17,7	1,6	NNW	N	706,9	0,2			1
	18.08.2017	5:03	17,2	17,2	6,4	NNE	NNE	707	0,2			1
	18.08.2017	5:08	16,9	16,9	3,2	N	N	707	0,2			2,4
	18.08.2017	5:10	16,8	16,8	6,4	NNE	NNE	707	0,2			5
	18.08.2017	5:15	16,6	16,6	4,8	N	NNW	707,1	0,2			2,6
	18.08.2017	5:21	16,5	16,5	1,6	NNW	NNW	707,1	0,2			2,2
	18.08.2017	5:38	16,6	16,6	4,8	NW	NW	707,1	0,2			0,8
	18.08.2017	5:53	16,6	16,6	3,2	WNW	WNW	707,1	0,2			0,8
	18.08.2017	5:59	16,6	16,6	4,8	WNW	WNW	707,1	0,2			2
	18.08.2017	6:42	16,6	16,6	4,8	WNW	WNW	707,4	0,2			0
	18.08.2017	7:10	16,7	16,7	4,8	NW	NW	707,6	0,2			0
	18.08.2017	7:53	16,9	16,9	4,8	WNW	WNW	707,6	0,2			0
	<b>18.08.2017</b>	<b>10:34</b>	<b>17,8</b>	<b>17,8</b>	<b>9,7</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>708,8</b>	<b>0,2</b>			<b>2,6</b>
	<b>18.08.2017</b>	<b>10:41</b>	<b>17,6</b>	<b>17,6</b>	<b>11,3</b>	<b>NNE</b>	<b>NE</b>	<b>708,9</b>	<b>0,2</b>			<b>1,8</b>
	<b>18.08.2017</b>	<b>11:04</b>	<b>16,3</b>	<b>16,3</b>	<b>16,1</b>	<b>NNE</b>	<b>N</b>	<b>709,1</b>	<b>0,2</b>			<b>0</b>
	<b>18.08.2017</b>	<b>11:40</b>	<b>15,8</b>	<b>15,8</b>	<b>9,7</b>	<b>N</b>	<b>NNE</b>	<b>709,3</b>	<b>0,2</b>			<b>0</b>
	<b>18.08.2017</b>	<b>11:58</b>	<b>15,8</b>	<b>15,8</b>	<b>11,3</b>	<b>NNE</b>	<b>N</b>	<b>709,3</b>	<b>0,2</b>			<b>0</b>

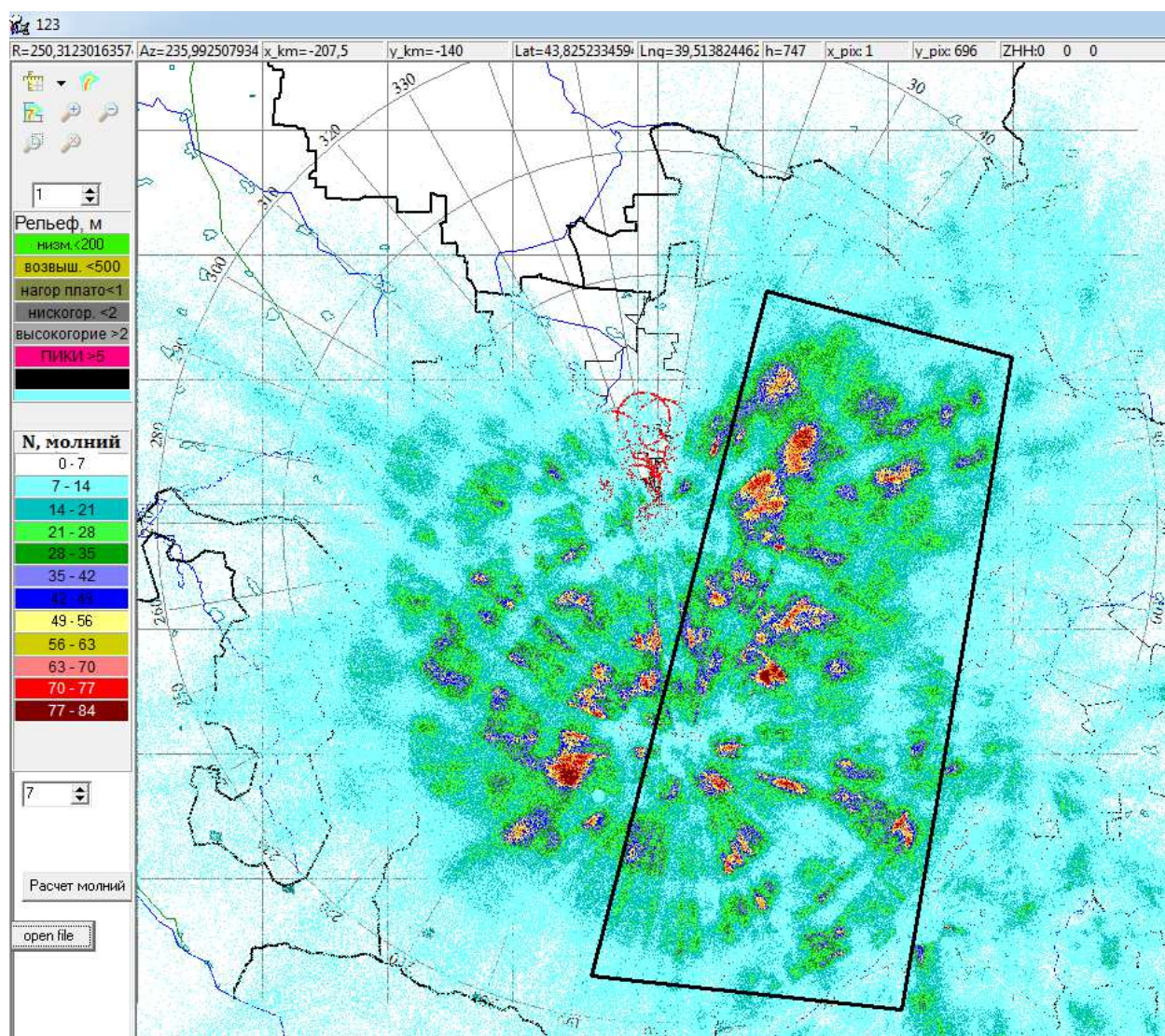
6	18.08.2017	12:27	15,8	15,8	3,2	N	NNW	709,7	0,2	4,6		0
	18.08.2017	13:05	15,7	15,7	1,6	NE	NE	710,1	0,2			0
	18.08.2017	13:18	15,7	15,7	0	NE	NNE	710,2	0,2			1
	18.08.2017	13:19	15,7	15,7	1,6	ENE	NE	710,2	0,2			9,6
	18.08.2017	13:20	15,7	15,7	0	ENE	ENE	710,2	0,2			10
	18.08.2017	13:23	15,8	15,8	0	N	N	710,2	0,2			5,2
	18.08.2017	13:25	15,8	15,8	1,6	SE	SE	710,2	0,2			7,6
	18.08.2017	13:26	15,8	15,8	0	---	---	710,3	0,2			10,6
	18.08.2017	13:27	15,8	15,8	0	SE	SE	710,3	0,2			11,2
	18.08.2017	13:28	15,8	15,8	1,6	SE	SE	710,2	0,2			11,2
	18.08.2017	13:30	15,8	15,8	0	SE	SE	710,2	0,2			8,2
	18.08.2017	13:32	15,7	15,8	3,2	ESE	ESE	710,2	0,2			7,2
	18.08.2017	13:34	15,7	15,7	1,6	E	E	710,2	0,2			6,2
	18.08.2017	13:46	15,6	15,6	3,2	SSE	SSE	710,3	0,2			1
	18.08.2017	13:58	15,6	15,6	0	ESE	ESE	710,3	0,2			1
	18.08.2017	14:45	15,6	15,6	6,4	SSE	SSE	710,5	0,2			0
	18.08.2017	15:04	15,8	15,8	4,8	SW	SW	710,5	0,2			0
	18.08.2017	15:39	16,2	16,2	8	SW	SW	710,3	0,2			0
7	20.08.17	18:53	22,4	22,5	8	SSW	S	708,5	0,2	0,8		0
	20.08.17	19:32	21,2	21,3	4,8	WSW	WSW	708,4	0,2			0
	20.08.17	19:37	21,1	21,1	8	WSW	SW	708,5	0,2			2,4
	20.08.17	20:54	20,2	20,2	6,4	W	W	708,5	0,2			0
	23.08.17	16:06	19,7	19,7	24,1	WNW	NW	706,8	0,2			0
	23.08.17	16:18	18,8	18,8	8	W	WNW	707,9	0,2			1
	23.08.17	16:20	18,8	18,8	6,4	WSW	W	708,1	0,4			19,4
	23.08.17	16:22	18,7	18,7	4,8	SW	SW	708,2	1,2			68,6
	23.08.17	16:23	18,7	18,7	9,7	WSW	SW	708,1	0,8			68,6

8	23.08.17	16:24	18,7	18,7	6,4	WSW	WSW	708,1	0,8	10,8		51,8
	23.08.17	16:25	18,6	18,6	11,3	WNW	WNW	708	0,4			52,6
	23.08.17	16:26	18,6	18,6	9,7	WNW	WSW	707,9	0,8			66,2
	23.08.17	16:27	18,6	18,6	6,4	WNW	WSW	707,9	0,8			65,4
	23.08.17	16:28	18,5	18,5	9,7	WNW	WNW	707,8	1,2			74,8
	23.08.17	16:29	18,4	18,5	12,9	WNW	WNW	707,8	0,4			60,6
	23.08.17	16:30	18,4	18,4	12,9	WNW	W	707,8	0,4			22,2
	23.08.17	16:31	18,4	18,4	11,3	WNW	W	707,9	0,2			20,2
	23.08.17	16:33	18,3	18,3	8	W	W	708	0,2			10,2
	23.08.17	16:36	18,2	18,2	6,4	W	WSW	707,9	0,2			10,6
	23.08.17	16:37	18,2	18,2	6,4	WSW	WSW	707,9	0,2			10,6
	23.08.17	16:38	18,2	18,2	6,4	WSW	WSW	707,9	0,4			21,8
	23.08.17	16:39	18,2	18,2	3,2	W	WSW	707,8	0,4			35,2
	23.08.17	16:40	18,2	18,2	4,8	W	W	707,8	0,4			40,8
	23.08.17	16:41	18,1	18,2	1,6	W	W	707,7	0,2			40,8
	23.08.17	16:46	18,1	18,1	9,7	NNW	NNW	707,3	0,2			2,8
	23.08.17	16:55	17,9	17,9	11,3	NW	NNW	707,2	0,2			1,4
	23.08.17	16:59	18	18	6,4	NW	NW	707,2	0,2			2,8
	23.08.17	17:03	18	18	4,8	WNW	WNW	707,2	0,2			3
	23.08.17	17:16	18,1	18,1	4,8	SSW	SSW	707,2	0,2			1

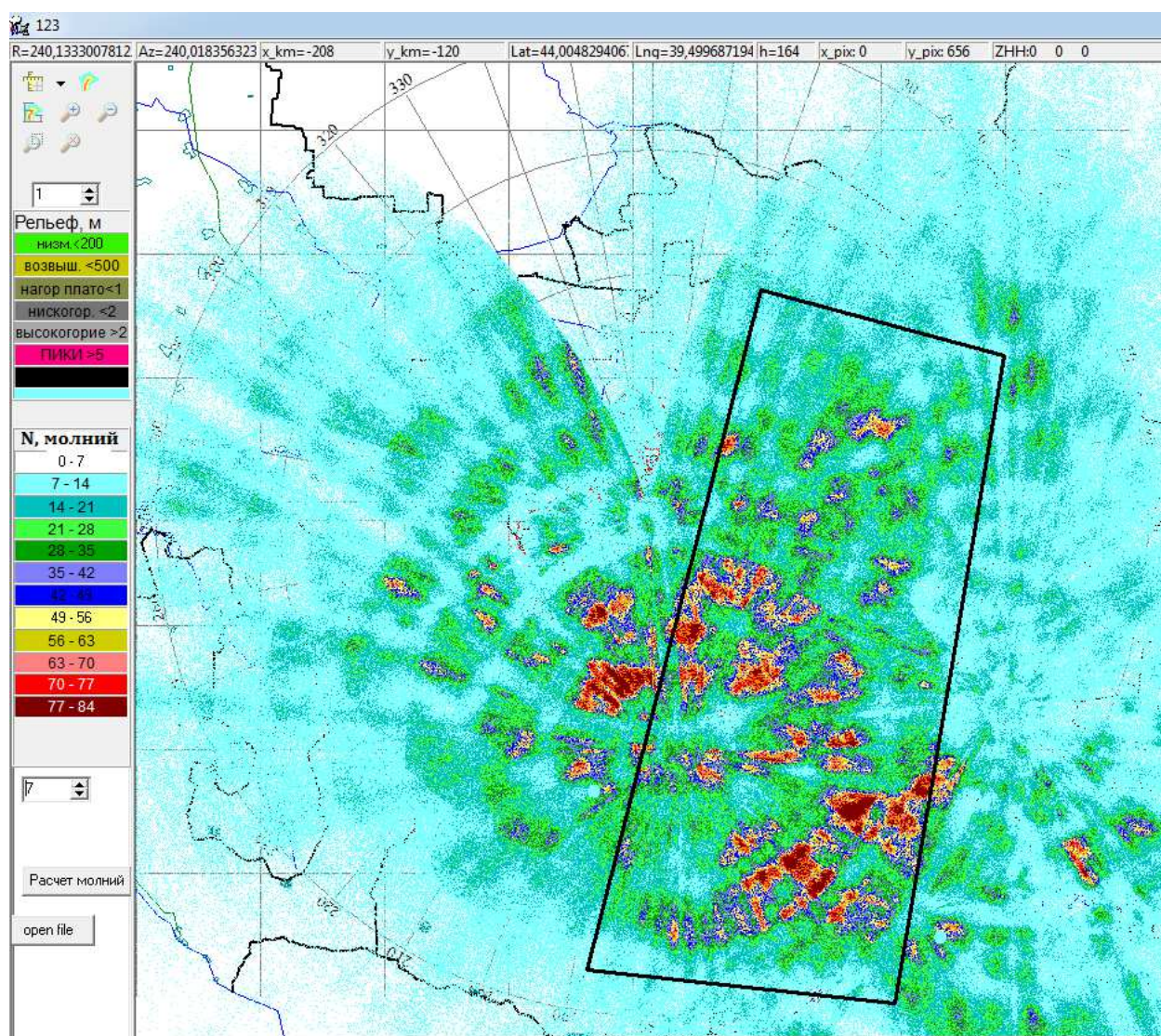
## Приложение 2.



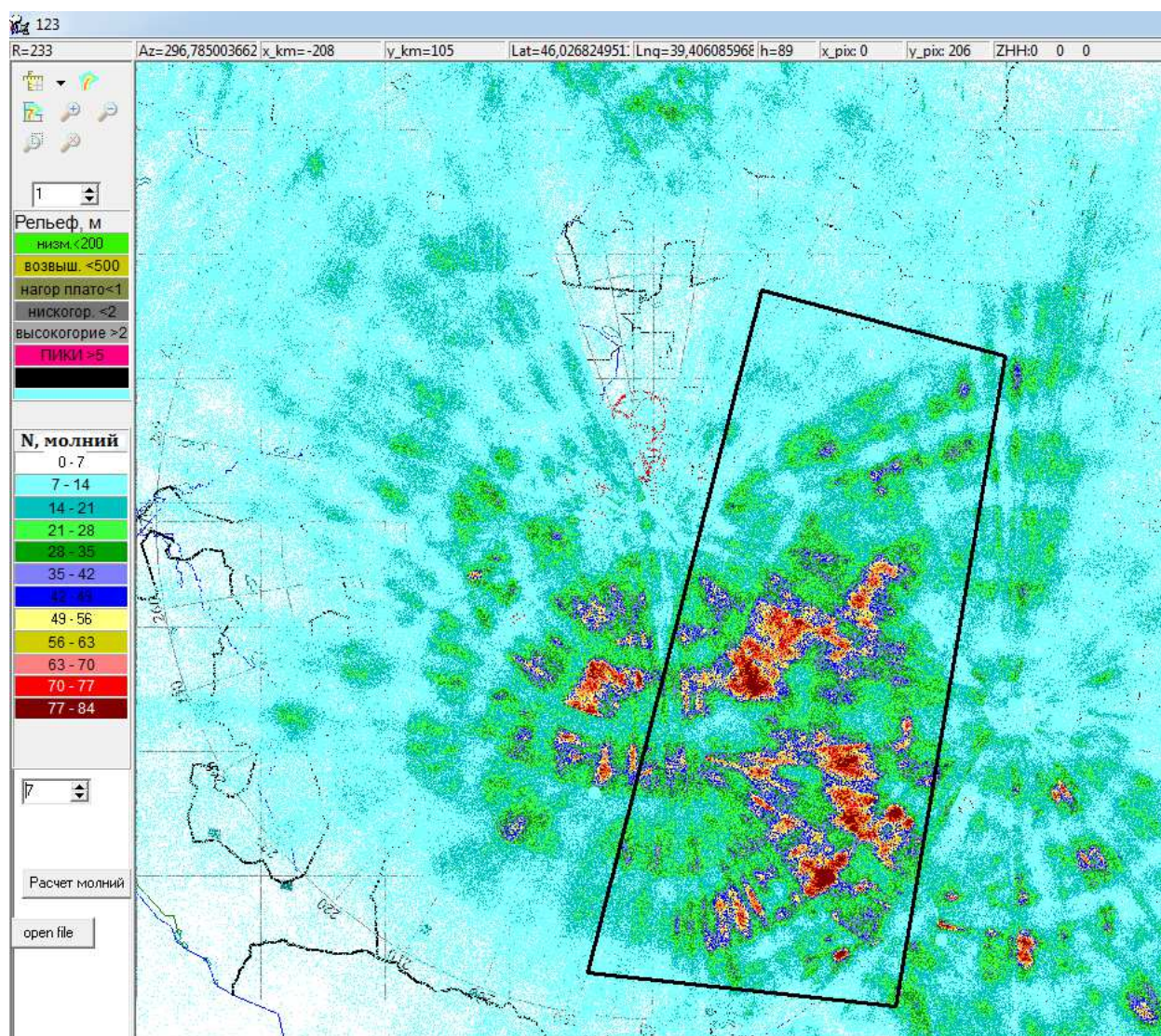
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2009 г.



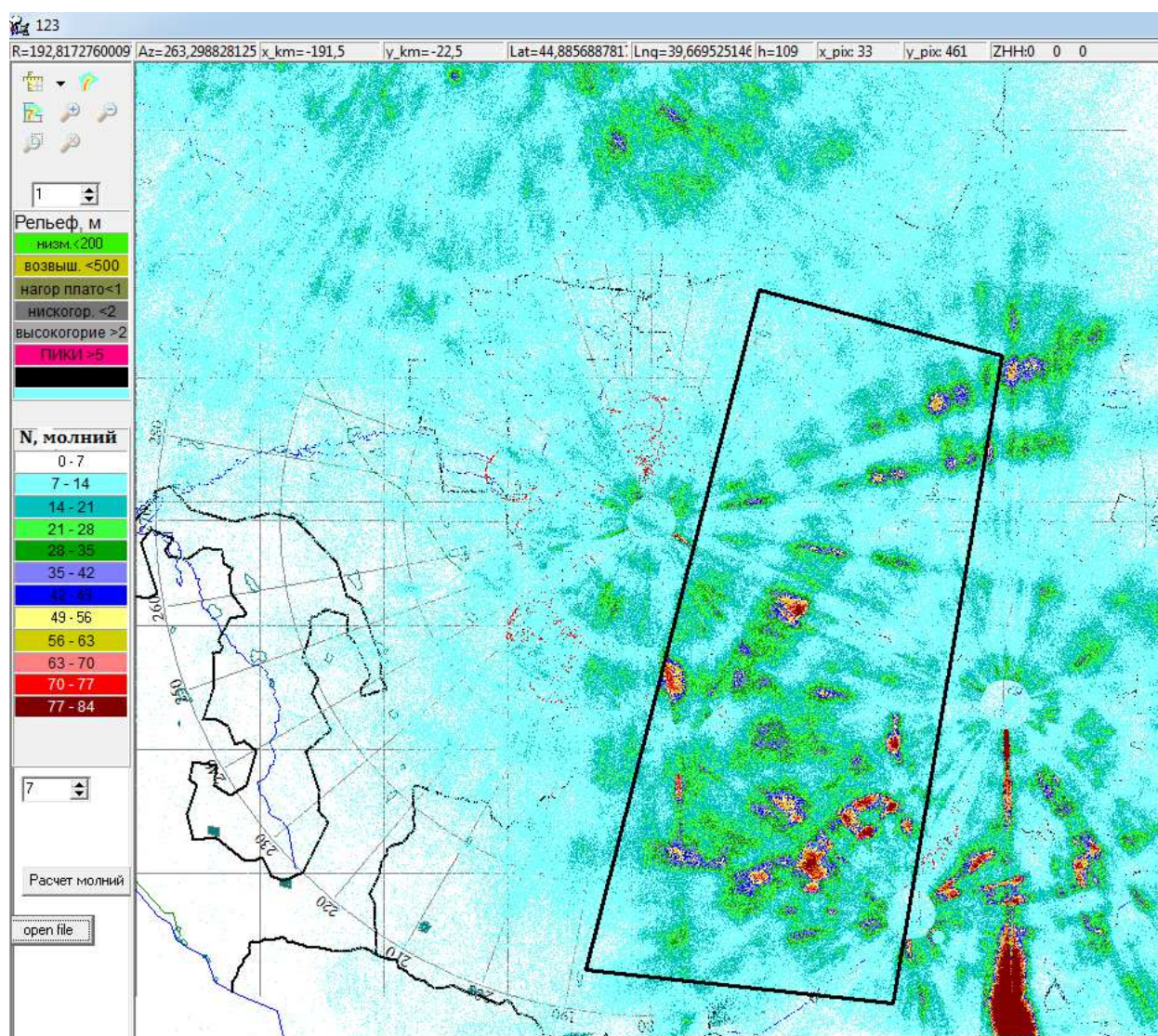
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2010 г.



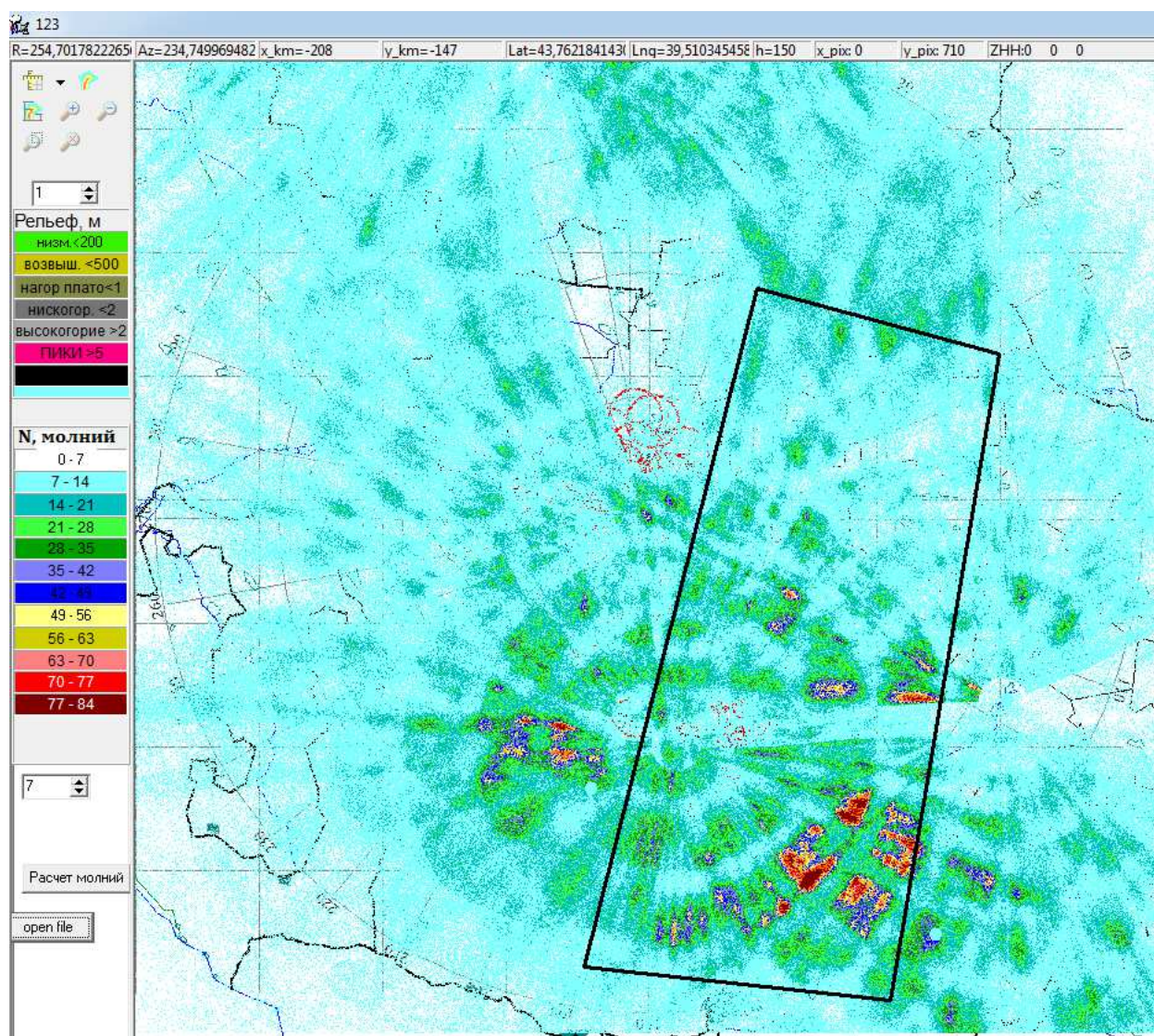
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2011 г.



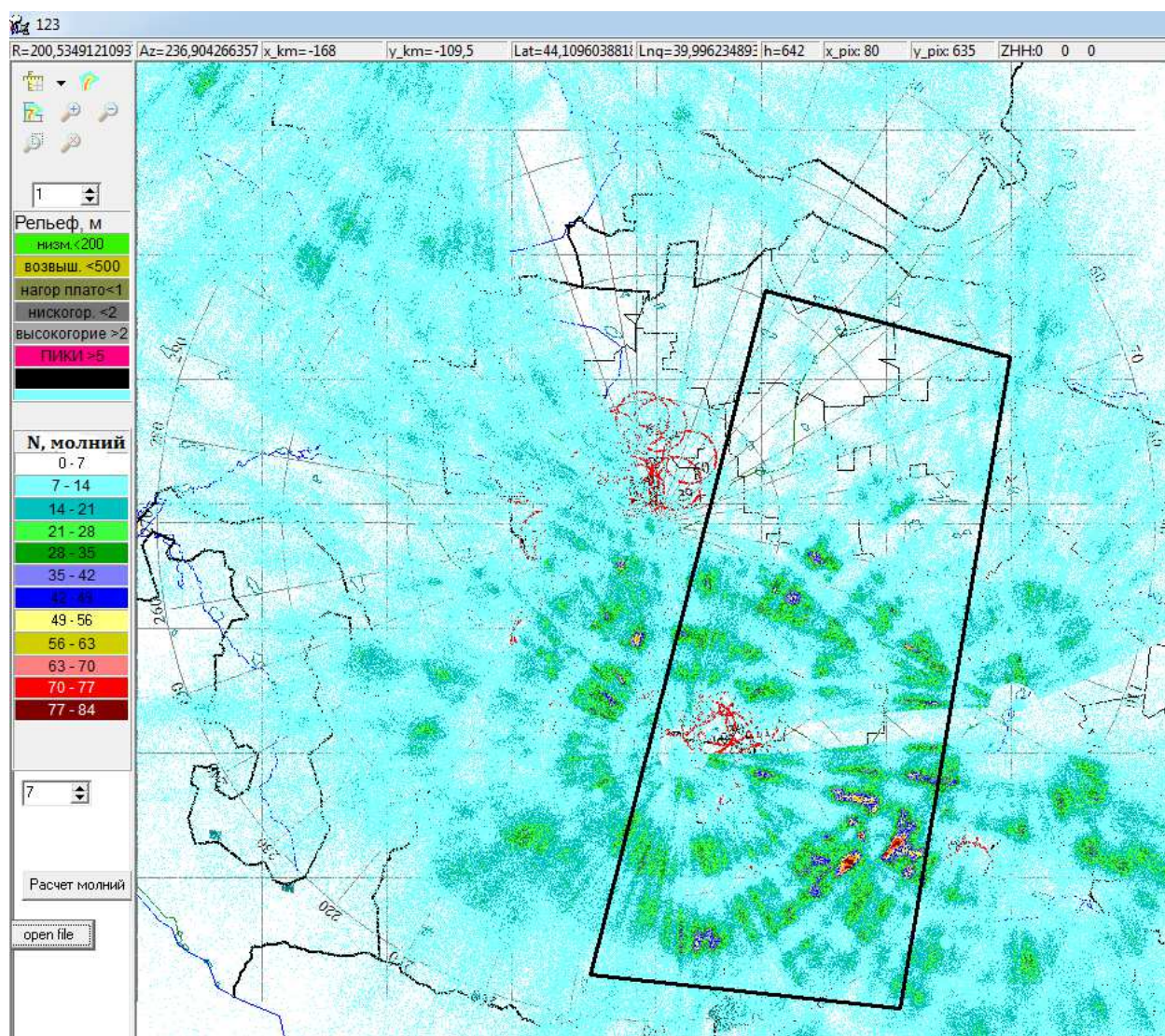
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2012 г.



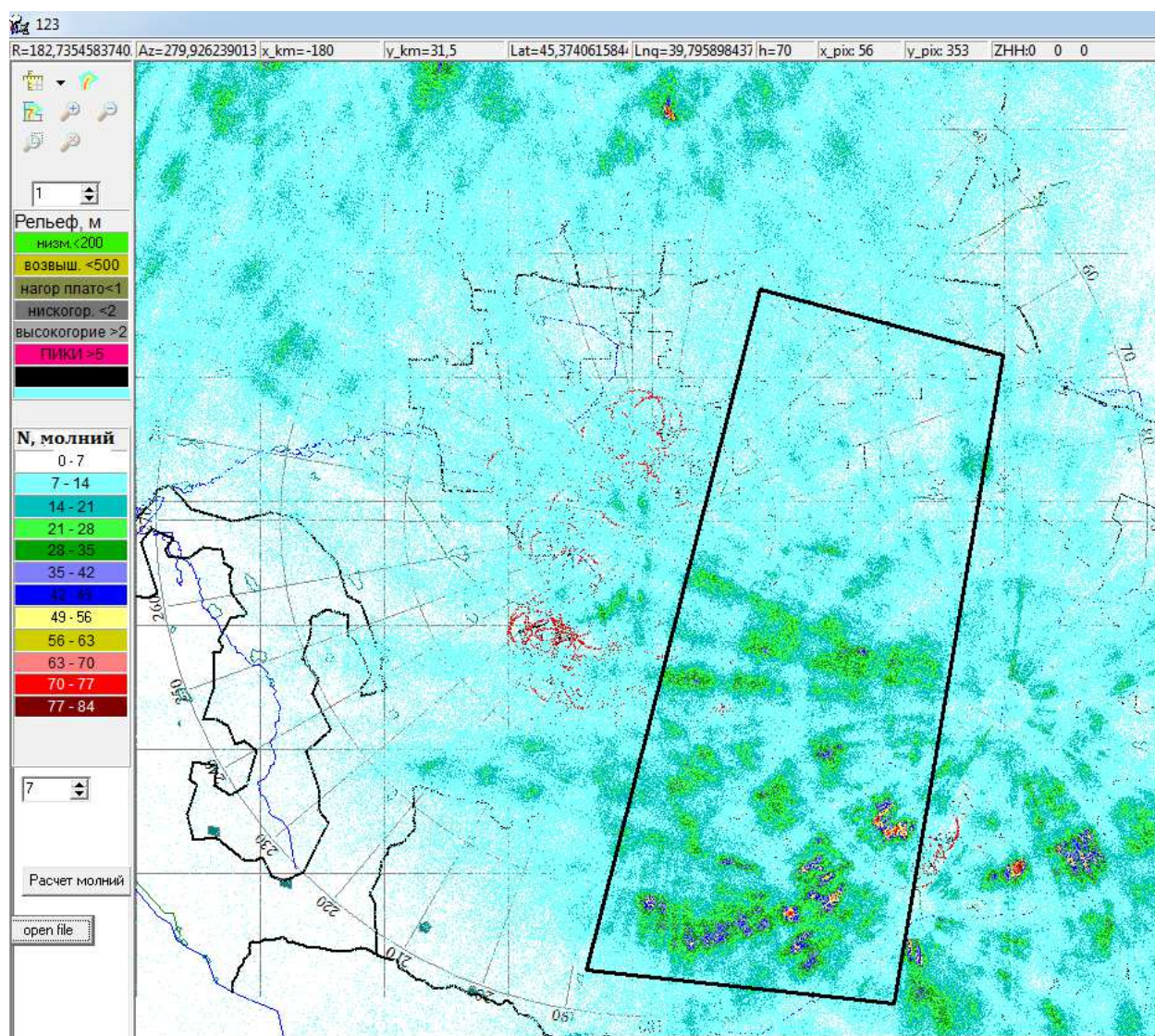
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2013 г.



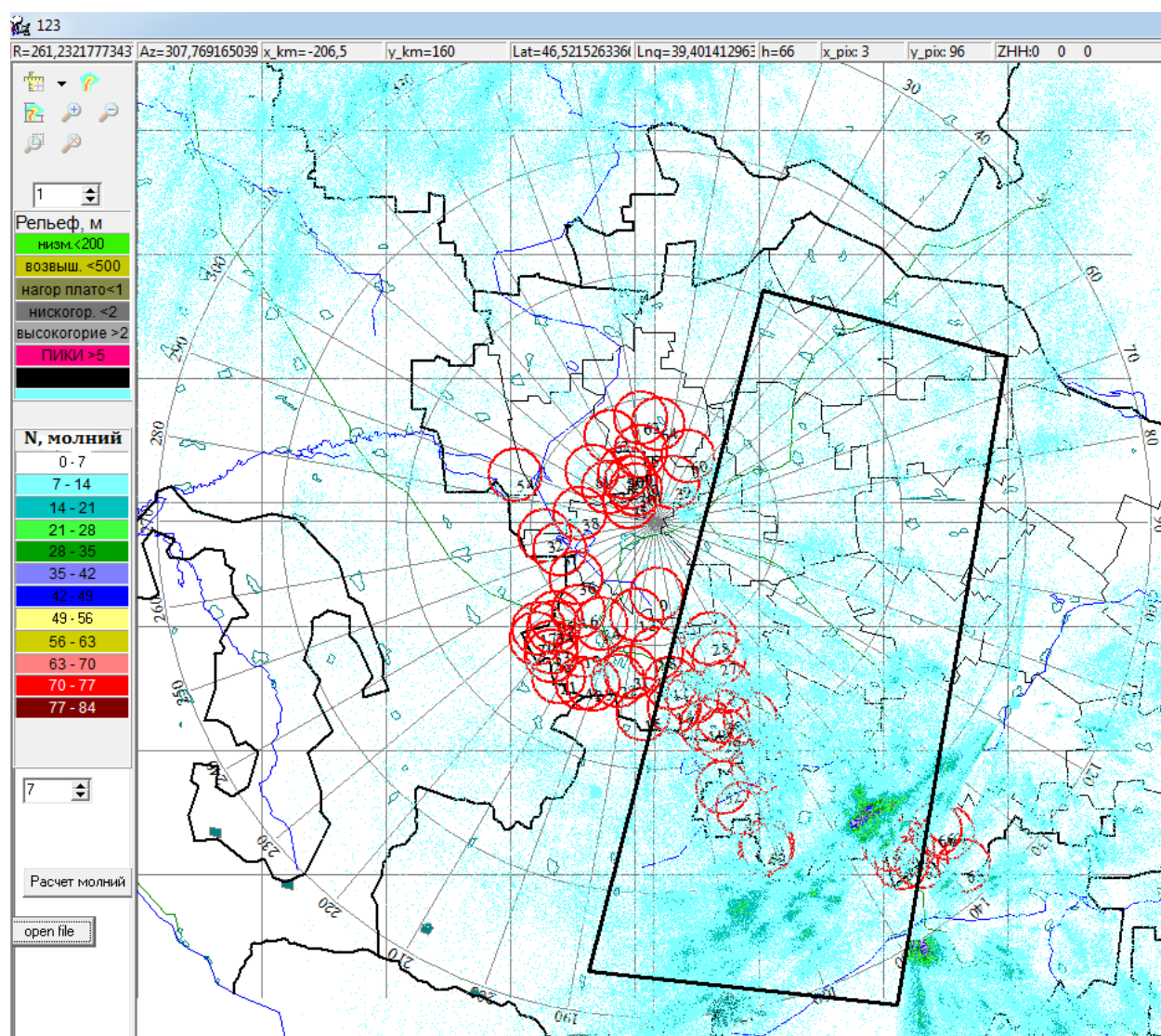
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2014 г.



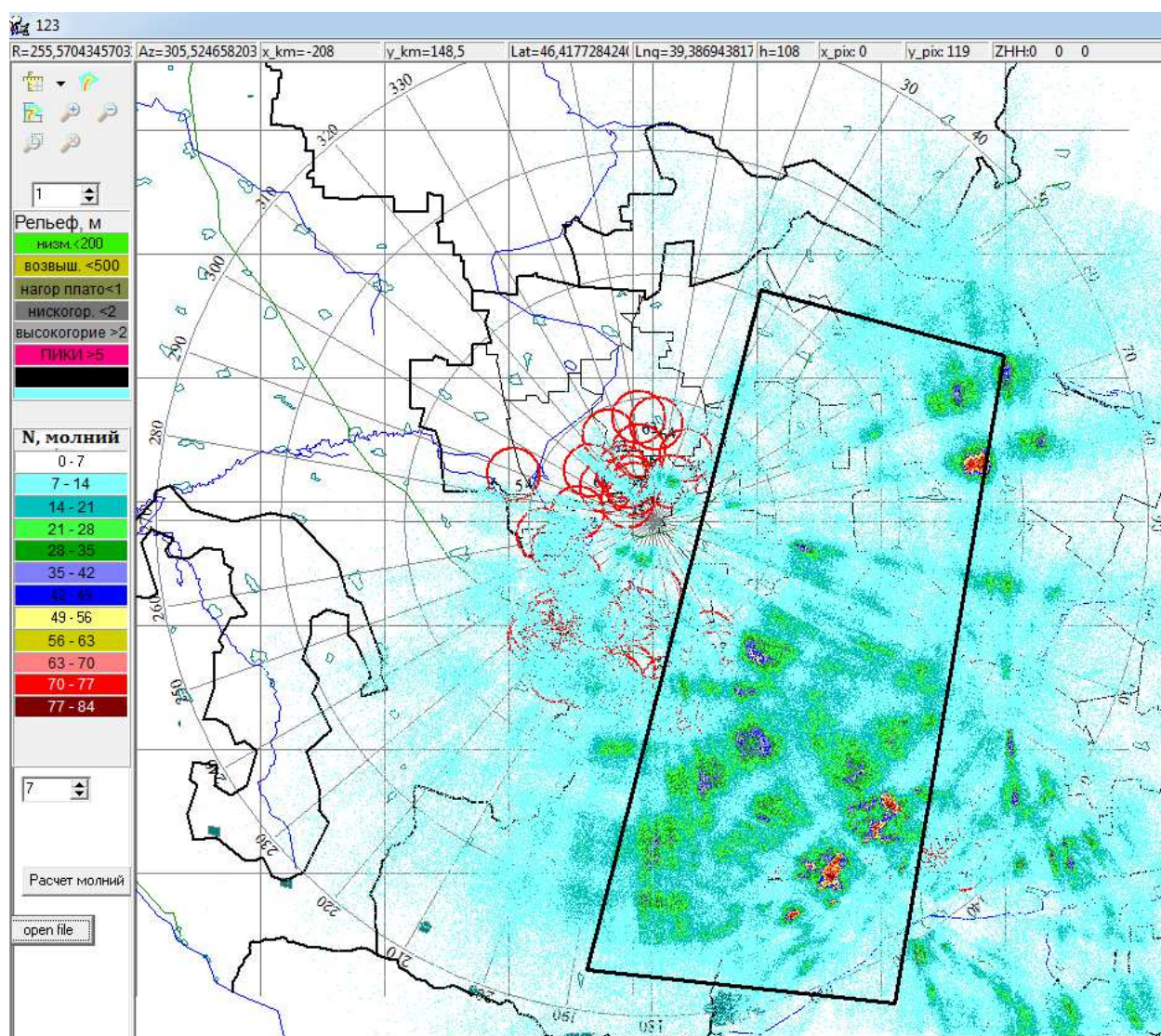
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2015 г.



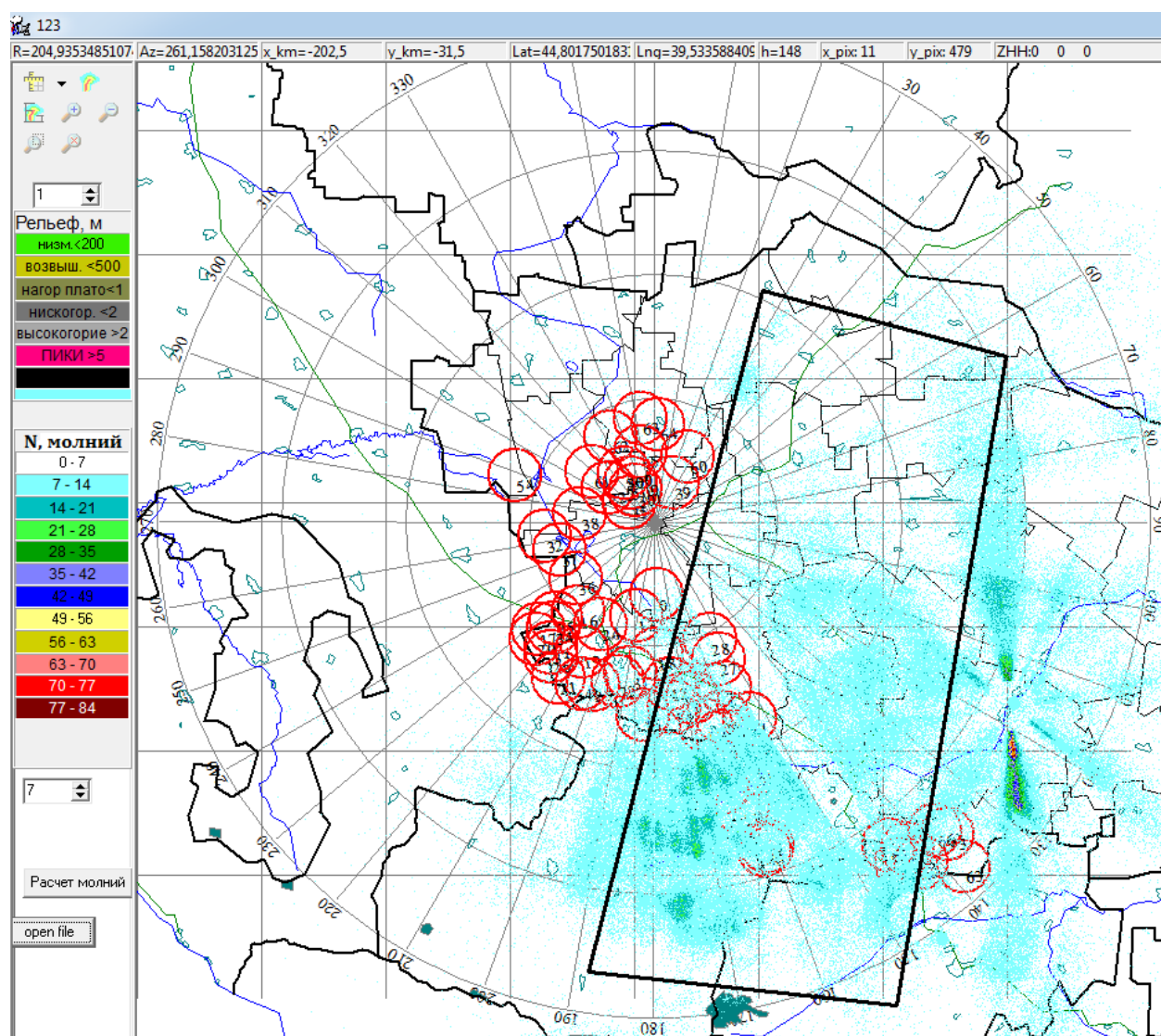
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2016 г.



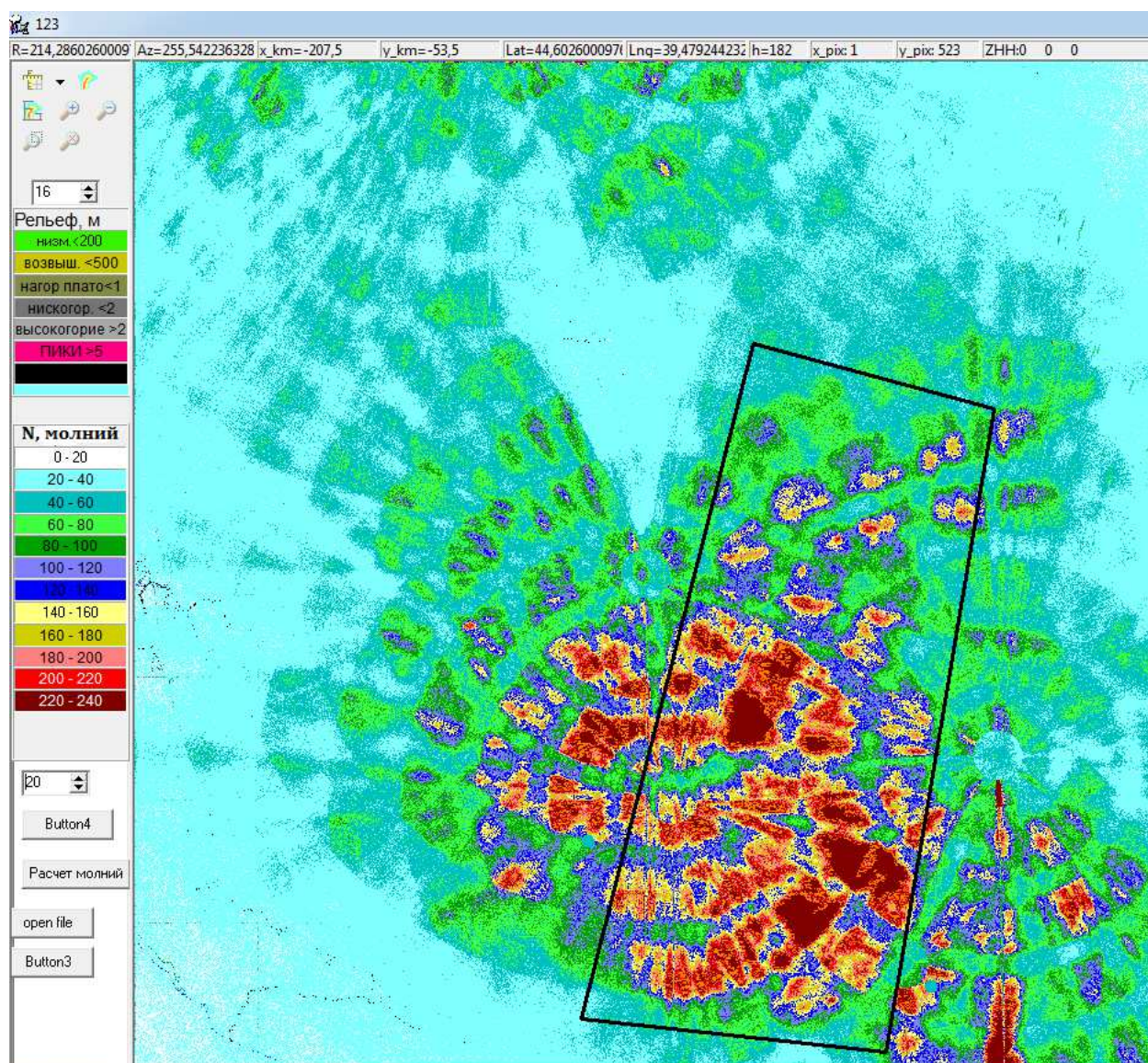
Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2017 г.



Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2018 г.



Распределение молний типа «облако-облако» по исследуемой территории за 2019 г.



Суммарное распределение разрядов «облако-облако» за 2009-2019 гг. на исследуемой территории.

## Приложение 3

Оценка погрешности измерения осадков.

N	S <sub>12</sub> , %	S <sub>24</sub> , %
1	85,00	12,50
2	0,00	0,00
3	0,00	50,00
4	259,90	0,00
5	44,44	250,00
6	100,00	250,00
7	0,00	60,00
8	0,00	95,00
9	56,82	66,67
10	100,00	16,67
11	100,00	11,11
12	133,33	20,00
13	77,14	66,67
14	100,00	50,00
15	66,67	100,00
16	100,00	0,00
17	50,00	50,00
18	50,00	166,67
19	11,11	46,15
20	25,00	50,00
21	57,14	81,48
22	33,33	23,37
23	50,00	279,90
24	0,00	25,00
25	0,00	29,95
26	0,00	250,00
27	0,00	14,94
28	96,88	0,00
29	41,67	22,22
<b>30</b>	81,30	62,50
<b>31</b>	81,82	0,00
32	75,00	33,33
33	75,00	42,86
34	100,00	100,00
35	23,37	40,00
36	90,00	50,00
37	0,00	0,00
38	100,00	42,86
39	279,90	0,00

40	98,75	50,00
41	16,67	145,00
42	0,00	25,00
43	0,00	41,26
44	22,22	10,71
45	62,50	83,33
46	44,44	14,29
47	50,00	133,33
48	0,00	100,00
49	38,46	51,28
50	100,00	20,00
51	100,00	100,00
52	50,00	0,00
53	100,00	33,33
54	50,00	30,77
55	100,00	62,50
56	100,00	71,43
57	50,00	18,00
58	100,00	0,00
59	25,00	85,00
60	50,00	33,33
61	50,00	100,00
62	66,67	76,00
63	100,00	93,94
64	14,29	33,33
65	100,00	50,00
66	100,00	50,00
67	146,00	50,00
68	111,11	100,00
69	100,00	27,27
70	0,00	83,33
71	44,44	
72	30,77	
73	51,67	
74	50,00	
75	150,00	
76	71,43	
77	74,62	
78	98,00	
79	66,67	
80	100,00	
81	95,00	
82	100,00	

83	40,00	
84	88,89	
85	98,13	
86	96,00	
87	100,00	
88	100,00	
89	50,00	
90	100,00	
91	100,00	
92	33,33	
93	100,00	
94	75,00	95
95	36,36	
	$S_{12\text{сред}}=67,8$	$S_{24\text{сред}}=56,4$

## Приложение А

## Акт внедрения докторской диссертации в ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС»

РОСГИДРОМЕТ

ФГБУ «Северо-Кавказское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

**Кабардино-Балкарский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды - филиал ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС»**  
(Кабардино-Балкарский ЦГМС)

Ленина, ул. д. 2, Нальчик, 360030, Тел. (8662) 42-55-74, факс 42-42-21

E-mail: kbmeteo@rambler.ru ОГРН 1030700211442, ИНН/КПП 0711026408/072101001

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Кабардино-Балкарского ЦГМС

Е.М. Богаченко

« 29 » 2024 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Жарашуева М.В. «Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки метеорологических данных для целей противогололедной защиты и штормоповещения»

1. Предмет внедрения: Программный комплекс «Автоматизированная система обработки и сопряжения радиолокационной и наземной информации метеостанций и постов «РадМет», созданной по свидетельствам на регистрацию программ для ЭВМ № 2017618059 от 21.07.2017г., №2018616642 от 05.06.2018 г и № 2018661469 от 07.09.2018 г.

2. Место внедрения: Кабардино-Балкарский ЦГМС.

3. Срок внедрения: 2023 год.

4. Работники, принявшие участие во внедрении:

- от организации разработчика: Жарашуев М.В.
- от внедрившей организации: Журавлёв А.Е., Варданян А.С., Морозова Е.Г.

4. Эффект от внедрения:

4.1. Автоматизация сопоставления радиолокационной и наземной информации о количестве осадков.

4.2. Визуализация информации метеостанций и постов на территории Северного - Кавказа.

4.3. Повышение информативности радиолокационной информации и данных метеостанций и постов.

Начальник ОСОИ

Программист

Синоптик 2-ой категории

Журавлёв А.Е.

Варданян А.С.

Морозова Е.Г.

## Приложение Б

## Акт внедрения докторской диссертации в КБГУ

**АКТ внедрения докторской диссертации в  
Кабардино-Балкарском Государственном Университете им. Х.М.  
Бербекова (КБГУ)**

## АКТ

внедрения результатов докторской диссертации работы Жарашуева Мурата Владимировича «Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки метеорологических данных для целей противорадовой защиты и штормоповещения»

Результаты докторской диссертации М.В. Жарашуева «Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки метеорологических данных для целей противорадовой защиты и штормоповещения», использованы в учебном процессе на кафедре теоретической и экспериментальной физике Института физики и математики КБГУ:

- для практического обучения бакалавров и магистров и выполнение выпускных квалификационных работ по профилю «Физика конденсированного состояния вещества»;
- в научно-исследовательских и проектных работах, выполняемых коллективами кафедр физики наносистем и кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Практические рекомендации по использованию результатов и выводов докторской диссертации Жарашуева М.В. «Исследование грозоградовой активности конвективных облаков на основе комплексной обработки грозопеленгационных, радиолокационных, и наземных данных» рассмотрены на НТС Института физики и математики 30 ноября 2023 г.

Директор Института физики и математики,  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
Б.И. Кунижев

21.12.2024



## Приложение В

## Акт внедрения докторской диссертации в ФГБУ «Северо-Кавказская ВС»

**А К Т**

о внедрении результатов диссертационной работы М.В. Жарашуева на тему  
«Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки  
метеорологических данных для целей противорадовой защиты и  
штормоповещения»

Результаты диссертационного исследования Жарашуева М.В. нашли отражение в работе отдела активных воздействий ФГБУ «Северо-Кавказская ВС». Используются следующие направления диссертационного исследования Жарашуева М.В.:

- анализ современного состояния методов и технических средств метеорологических наблюдений;
- методы, алгоритмы и программы автоматической обработки грозопеленгационной, радиолокационной и наземной информации от метеостанций и постов;
- исследования грозоградовой активности конвективных облаков на основе комплексной обработки грозопеленгационных, радиолокационных, и наземных данных;
- интеграция (комплексирование) грозопеленгационной информации, данных радиолокационных сетей и наземных данных метеостанций и постов на Северном Кавказе.

Зам. начальника  
ФГБУ «Северо-Кавказская ВС»

М.Г. Жигатов

## Приложение Г

## Акт внедрения НПЦ «Антиград»

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Научно-  
производственный центр «Антиград»

А.М. Абшаев

«15» декабря 2023 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ)

результатов диссертационной работы Жарашуева Мурата Владимировича «Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки метеорологических данных для противоградовых служб и сети штормоповещения»

1. Организация разработчик: ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Росгидромета.
2. Научный руководитель: доктор физ-мат наук А.М. Абшаев.
3. Предмет внедрения: Новый плювиограф для измерения атмосферных осадков по Патенту России № 2694274 от 2019 г. «Плювиограф измерения атмосферных осадков»
4. Организация, внедряющая результат: ООО НПЦ «Антиград».
5. Место внедрения:
6. Сроки внедрения: плановый: 2021 – 2023 гг.; фактический: 2022 г.
7. Работники, принявшие участие во внедрении:
  - от организации разработчика: Жарашуев М.В.
  - от внедрившей организации: Абшаев М.Т., Абшаев А.М.
8. Эффект от внедрения (использования) результатов внедрения: Обеспечена более высокая степень корреляции радиолокационной информации и данных наземных измерений с помощью плювиографа. За счет применения плювиографа с большей площадью водосборника, корреляция радиолокационных и наземных данных увеличилась на 20%.

Главный научный сотрудник НПЦ «Антиград»

М.Т. Абшаев

«15» 12 2023 г.

# Приложение Д

## Справка ФГБУ «ВГИ»

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
(Росгидромет)

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение  
«ВЫСОКОГОРНЫЙ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
(ФГБУ «ВГИ»)

г. Дзержинск, 2, Набережная, 603000  
Телефон: (836 25) 40 24 40, e-mail: vgi@roshydromet.ru  
ОКПО: 02572841, ОГРН: 1030000000000  
ИНН: 0010000000, ОГРН: 1030000000000

24 янв 2024 № 403/12-02-23/53

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### Справка

Настоящим подтверждаем, что часть результатов диссертационного исследования на тему «Разработка методов и алгоритмов сопряжения и обработки метеорологических данных для противорадовых служб и сети штормооповещения» Жарашуева М.В., изложенных в работах:

- Жарашуев М.В. Программа автоматической идентификации конвективных ячеек // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618059, 21.07.2017, Заявка № 2017615257 от 02.06.2017;
- 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.г.
- Жарашуев М.В. Программа статистической обработки грозоидентификационной информации о молниях типа земля-небо на территории Северного Кавказа и Ставропольского края // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019617757, 20.06.2019, Заявка № 2019615232 от 08.05.2019.

использованы в практике научно-технологических исследований грозоградовой активности конвективных облаков, в выполненных Высокогорным геофизическим институтом научно-исследовательских работах (НИР) с участием Жарашуева М.В. по договору с ФГБУ «Центральная агрологическая обсерватория» в 2013 г., а также НИР при участии и под руководством Жарашуева М.В. в период 2018 - 2019 гг., по теме 1.6.5.3 «Исследование возможности адаптации ракетного метода воздействия на облака для искусственного увеличения осадков с целью расширения функций ВС Росгидромета».

Врио директора



М.Ю. Беккиев