

На правах рукописи

УДК 551.508.86

Снегуров Александр Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ПЕЛЕНГАЦИИ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ**

Специальность 25.00.30 – метеорология,
климатология, агрометеорология

**Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург
2005**

Диссертация выполнена в Государственном учреждении
«Главная Геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Г.Г.Щукин

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор В.Д.Степаненко

доктор физико-математических наук,
профессор Л.И.Дивинский

Ведущая организация: Военно-космическая Академия
им.А.Ф.Можайского

Защита состоится « 18 » 08 2006г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д327.005.01 при Государственном учреждении
«Главная Геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова» по адресу: 194021,
Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного
учреждения «Главная Геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова»

Автореферат разослан « 14 » 12 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
доктор географических наук

A. Meshcher

А.В.Мещерская

2006-4

28192

На правах рукописи

УДК 551.508.86

Снегуров Александр Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ЦЕЛЕНГАЦИИ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ**

Специальность 25.00.30 – метеорология,
климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2005

2 253987

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и состояние вопроса. В настоящее время на сети Росгидромета используется визуально-слуховой метод наблюдений за грозами. Среднесуточная вероятность обнаружения гроз визуальным методом не превышает 58 %. Этот метод не позволяет оценить интенсивность грозовых процессов их пространственно-временное распределение. Сократилась сеть метеорологических радиолокаторов (МРЛ). Наиболее интенсивно в настоящее время они используются на Северо-Западе, в Московской и Северо-Кавказской зонах. Используя критерии грозоопасности, вычисленные по ряду измеренных параметров с помощью МРЛ, определяют вероятность появления грозовых процессов в конвективных облаках. Вероятность правильного распознавания гроз носит статистический характер, зависит от большого числа внешних факторов, связанных как с физико-географическими условиями развития грозовых процессов, так и с техническим состоянием измерительной аппаратуры, подготовленностью обслуживающего персонала. МРЛ неэффективно работает в условиях горной местности, где имеются большие участки с закрытым горизонтом. Повышение эффективности обнаружения и распознавания гроз возможно с помощью пассивных средств регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) грозовых разрядов. К таким средствам относятся однопунктовые и многопунктовые системы местоопределения грозовых очагов и разрядов. В большинстве из них (исключение составляют многопунктовые разностно-дальномерные системы) используются радиопеленгаторы и дальномеры, основы которых были заложены в 20-е годы прошлого века. В 60-е – 80-е годы использовались узкополосные методы пеленгации гроз, а в конце 20-го века нашел свое применение, в основном за рубежом, широкополосный метод. В отечественной практике, во второй половине 20-го века, использовались преимущественно узкополосные грозопеленгаторы с амплитудным и амплитудно-фазовым преобразованием узкополосных сигналов, узкополосные амплитудные, фазовые и широкополосный импульсный грозодальномеры (пеленгаторы МАРП СДВ, ПАГ-1, однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры (ОГПД) «ШТОРМ», «ОЧАГ-2П», «ФАГ-1», «Пеленг»). В начале 90-х годов появились проекты «Апельсин», «Верей» и «Алвес» по разработке широкополосных модификаций приемников для грозопеленгаторов, пеленгационных и разностно-дальномерных систем местоопределения грозовых очагов и разрядов. В связи с этим, основной интерес для разработки аппаратной части приемников грозопеленгаторов и дальномеров представляют результаты исследования возможных ошибок измерения пеленга и дальности, а также оценка требований к основным блокам измерительной аппаратуры. Грозопеленгаторы, объединенные в сети или совмещенные с однопунктовыми грозодальномерами, позволяют решать задачи штормового оповещения как самостоятельно, так и в составе комплексов мониторинга



контроля окружающей среды, в частности, с метеорологическими радиолокаторами (МРЛ).

Основные цели и задачи диссертационного исследования. Основная цель работы заключается в разработке аппаратно-программного обеспечения комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными и пассивными средствами измерений и в усовершенствовании методики повышения эффективности грозового оповещения с помощью пассивных инструментальных методов измерений координат грозовых очагов и разрядов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- обобщить материалы экспериментальных работ по оценке вероятности правильного распознавания гроз с помощью МРЛ по сравнению с данными визуальных наблюдений наземных метеостанций и пеленгационными средствами определения местоположения грозовых очагов и разрядов;

- разработать аппаратно-программное обеспечение и провести исследование электрической E_z и магнитных H_x , H_y составляющих электромагнитного излучения молниевых разрядов;

- выполнить анализ погрешностей измерения пеленга и дальности грозопеленгаторами-дальномерами различных конструкций;

- разработать две версии аппаратно-программного обеспечения для однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров (ОГПД) с зонами действия до 30-50 км и до 200-300 км;

- разработать аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными и пассивными средствами измерений, провести наблюдения и обобщить данные ОГПД «Алвес», многопунктовой пеленгационной системы местоопределения гроз (ПСМГ) и метеорологического радиолокатора МРЛ;

- разработать предложения по оснащению сети пеленгации гроз Росгидромета.

Научная новизна работы. Впервые разработано аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений. Исследованы погрешности измерений нового поколения отечественных узкополосных и широкополосных грозопеленгаторов и дальномеров.

Автором получены следующие результаты:

- разработано аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений для повышения эффективности штормового оповещения;

- разработано аппаратно-программное обеспечение комплексов с различной разрешающей способностью и получены результаты анализа

амплитудных параметров электромагнитного излучения молниевых разрядов в полосе частот от 0,3 до 60 кГц для ближней зоны;

- на базе экспериментальных исследований оценены погрешности измерения пеленга и дальности, которые возникают в результате воздействия внешних электромагнитных шумов и влияния пространственной ориентации каналов молниевых разрядов в ближней до 30-50 км зоне;

- разработана методика и получены материалы совместных наблюдений за грозами комплексом местоопределения грозовых очагов активным (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений, которые показывают, что в своей рабочей зоне до 200 км вероятность распознавания гроз МРЛ можно увеличить на 25-30%.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что автором создано аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активным (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений. В 2004-2005 гг. проведены совместные наблюдения за грозовыми процессами на базе НИЦ ДЗА, филиала ГТО им.А.И.Воейкова.

Разработано аппаратно-программное обеспечение и экспериментально исследованы амплитудные параметры электромагнитного излучения молний в полосе частот 0,3-60 кГц, погрешности измерения пеленга и дальности в зоне до 200-300 км. Обоснованы требования к построению аппаратной части грозопеленгаторов и дальномеров, разработано аппаратно-программное обеспечение однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров с зоной до 30-50 км и до 200-300 км.

Разработанные автором аппаратно-программное обеспечение комплекса регистрации форм ЭМИ молний и грозопеленгаторы-дальномеры, использовались в системе мониторинга электрического состояния конвективных облаков при проведении активных воздействий, оперативных работ по наблюдениям за грозовой деятельностью в Ленинградской области с 1993 по 2005 гг. и в НИР по Планам Росгидромета в части разработки программы построения грозопеленгационных сетей в России и предложений по оснащению сети МРЛ системами грозооповещения с целью повышения ее эффективности.

Разделы работы выполнены в рамках целевых научно-технических программ, выполняемых НИЦ ДЗА по заданию Росгидромета с 1992 по 2005 гг.

Апробация работы и публикации. Полученные в ходе выполнения работы результаты докладывались и обсуждались на международном симпозиуме по атмосферному электричеству (Ленинград, 1992 год), ЦКПМ Росгидромета (1994 г), на семинарах отдела атмосферного электричества НИЦ ДЗА и совещаниях по вопросам грозопеленгации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ.

На защиту выносятся:

- методика, версии аппаратно-программного обеспечения комплексов с различной разрешающей способностью и материалы по исследованию

амплитудных параметров электромагнитного излучения молниевых разрядов в полосе частот от 0,3 до 60 кГц в ближней зоне;

- данные по экспериментальному исследованию погрешности измерения пеленга и дальности грозопеленгаторами и дальномерами различной конструкции;

- методика, аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными и пассивными средствами измерений и материалы по исследованию вероятностных характеристик распознавания гроз МРЛ-5 по сравнению с пассивными радиотехническими средствами, в частности, однопунктовым грозопеленгатором, грозопеленгатором-дальномером ОГПД «Алвес» и пеленгационной системой местоопределения гроз (ПСМГ);

Личный вклад автора:

- обобщены материалы экспериментальных исследований вероятностных параметров распознавания гроз МРЛ по сравнению с данными визуальных наблюдений наземных метеостанций и пеленгационных систем;

- разработаны аппаратура и программное обеспечение, проведена регистрация широкополосных сигналов ЭМИ молний в ближней зоне и исследованы погрешности измерения пеленга и дальности грозопеленгаторами-дальномерами различной конструкции;

- разработано аппаратно-программное обеспечение грозопеленгаторов - дальномеров с зонами действия до 30-50 км и до 200-300 км;

- разработано аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активным (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений;

- проведены наблюдения, обработаны и обобщены данные по совместному использованию пеленгатора, пеленгатора-дальномера ОГПД «Алвес», ПСМГ и МРЛ-5.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 92 наименований, содержит 149 страниц основного текста, в том числе 43 рисунка и 42 таблицы.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены активный, пассивный и активно-пассивный (радиолокационно-пеленгационный) методы распознавания гроз. В основу активного радиолокационного метода распознавания гроз положены критерии грозоопасности, вычисленные по ряду измеренных с помощью радиолокационной станции и радиозонда параметров. Пассивный метод основан на измерении параметров собственного электромагнитного излучения грозовых разрядов в широком диапазоне частот. В

радиолокационно-пеленгационном (активно-пассивном) методе используются данные совместных наблюдений с помощью МРЛ и системы пеленгации гроз.

В разделе 1.1. анализируются основные результаты экспериментальных работ по исследованию эффективности радиолокационного метода распознавания гроз, которые опубликованы в отечественной литературе за последние 50 лет. Сравнение данных визуальных наблюдений на наземной сети с данными измерений параметров конвективных облаков с помощью МРЛ и применение различных алгоритмов их обработки показывает, что МРЛ обеспечивает вероятность правильного распознавания гроз и ливней в 72% - 85% случаев. Суммарная ошибка составляет 18% – 27%. Графики на рис.1.1. иллюстрируют распределения вероятности правильного распознавания гроз $P_{распГ}$, вероятности ошибки распознавания ливней – вероятности ложных тревог $P_{лтп}$, когда ливни выдаются за грозы и вероятности пропуска гроз $P_{пр}$ для случаев, когда используются следующие алгоритмы и схемы обработки данных радиолокационных измерений:

1. Критерий превышения порога для максимальной высоты $H_{макс}$;
2. Критерий превышения порога для отражаемости Z_2 в слое 2-4 км;
3. Критерий мажоритарного выбора по двум признакам $H_{макс}$ и Z_2 ;
4. Критерий мажоритарного выбора по двум признакам $H_{макс}$ и Z_3 ;
5. Дискриминантная функция двух признаков NZ_1 ;
6. Дискриминантная функция двух признаков NZ_2 ;
7. Дискриминантный анализ совокупности ряда алгоритмов, в том числе, высоты изотермы $-22^{\circ}C$.

Они показывают, что вероятность распознавания радиоэха с грозами с помощью схем и алгоритмов, разработанных до настоящего времени, не превышает 80-85%. Эти цифры, видимо, можно принимать как прогностические для оценки грозоопасности конвективных облаков. Количество ложных тревог меняется от 4-5% до 28%.

В разделе 1.2. рассмотрены пассивные пеленгационно-дальномерные методы регистрации гроз, которые были реализованы в конкретных промышленных образцах. О пассивных методах местоопределения грозových очагов и разрядов написаны монографии (их авторы Е.В.Кашпровский; Л.Г.Махоткин и Б.К. Иньков; Н.В.Бару, И.И.Кононов и М.Е.Соломоник; В.Д.Степаненко и С.М.Гальперин). Применимость дипольных представлений молниевых разряда в спектральной и временной области теоретически и экспериментально доказана в работах Мюллер-Хиллебрандта, Л.Рунке, Я.Фризуса, И.И.Коконова.

Для определения азимута амплитудным методом используется простое соотношение следующего вида:

$$\varphi = \arctg (H_y/H_x), \quad (1)$$

где H_x и H_y амплитуды магнитных составляющих. Измеренное значение пеленга можно представить некоторым средним значением $\bar{\varphi}$, которое включает в себя истинное значение пеленга на источник излучения φ и

систематическую погрешность измерений φ_s , с дисперсией σ_{Σ}^2 (случайной погрешностью измерений).

$$\bar{\varphi} = \varphi + (\varphi_s \pm \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2}) , \quad (2)$$

Систематическая погрешность измерений обусловлена неточностью установки антенн пеленгаторов φ_p , погрешностью пункта φ_{se} , неидентичностью каналов приемников пеленгаторов φ_{eh} и местоположением канала молнии относительно измерительного пункта φ_{xy} . Случайные погрешности появляются в результате влияния поляризации $\sigma_{то}$ и

Значения вероятности правильного распознавания гроз (точка 1), вероятности ложных тревог(2) и вероятности пропуска гроз (3)

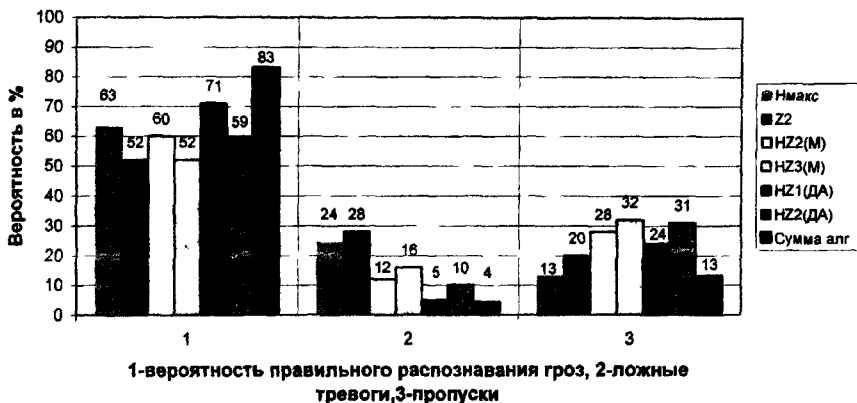


Рис.1

аппаратурной погрешности σ_a , обусловленной неточностью аналого-цифрового преобразования, нарушением динамического диапазона измерений и влиянием шумов. Таким образом, суммарная случайная погрешность равна:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{то}^2 + \sigma_a^2 , \quad (3)$$

В работах упомянутых выше авторов оценки поляризационных ошибок узкополосных пеленгаторов рассмотрены теоретически.

Переход от узкополосных методов измерений пеленга к широкополосному методу обусловлен стремлением разработчиков снизить погрешности пеленгования, вызванные изменением пространственной ориентации молниевых разрядов, и повысить быстрдействие пеленгатора.

Следует отметить, что до настоящего времени опубликовано незначительное число работ, посвященных экспериментальным исследованиям погрешности пеленгования грозových разрядов различными типами пеленгаторов в зоне до 100 км.

В отечественной практике, для определения расстояния до грозových разрядов из одного пункта в зоне до 200-300 км, практически использовались четыре метода определения дальности: амплитудный Е, амплитудный ЕН, импульсный ЕН и Фазовый Е методы.

Указанные методы были реализованы в отечественных однопунктовых грозопеленгаторах-дальномерах ПАГ-1, Очаг 2П, ФАГ-1 и некоторое время выпускались промышленностью. Испытания этих устройств показали, что вероятность обнаружения гроз в радиусе до 300 км грозопеленгатором ПАГ-1 составила 95%. Вероятность обнаружения гроз на удалениях более 400 км была менее 4%, а вероятность пропусков в зоне до 300 км не превысила 5%.

ОГПД «Очаг-2П», с градациями дальности: 0-30; 30-75; 75-200 и 200-400 км, обеспечивал в зоне действия вероятность обнаружения гроз не менее 90% и в 73-80% случаев правильно (в пределах градации дальности) определял местоположение гроз. Вероятность погрешности в одну градацию не превышала 13%, количество ложных тревог и пропусков составляло не более 3% и 10% соответственно.

Широкополосный ЕН-дальномер в ОГПД «Очаг-2П» обеспечивал вероятность правильного определения местоположения очагов в 70% случаев, вероятность ложных тревог составляла 22% и вероятность пропуска грозových очагов - 5%.

Фазовый анализатор грозоопасности ФАГ-1 (фазовый Е-метод) обеспечивал регистрацию гроз в зоне до 70 км по градации 0-10; 10-20 км и т.д.).

Повышение точности измерения координат грозových разрядов в зоне до 200 - 300 км возможно с помощью многопунктовых пеленгационных, разностно-дальномерных или комбинированных пеленгационно-разностно-дальномерных систем. Вероятность обнаружения гроз пеленгационной системой внутри сети составляет более 70 %, а погрешность измерения дальности не превышает 1-2 километров.

В разделе 1.3. анализируются результаты использования радиолокационно-пеленгационного метода распознавания гроз.

Первые данные совместного использования грозопеленгатора МАРП СДВ, МРЛ и визуальных наблюдений наземной метеорологической сети для распознавания гроз были получены В.Д.Степаненко, С.М.Гальпериным и М.Е.Соломоником в 1967 году. В грозовой сезон 1972 г. в зональных гидрометеорологических обсерваториях Минска, Гомеля, Бреста и аэропорту Ленинграда были проведены эксперименты по совместному применению грозопеленгатора ПАГ-1 в составе метеорологического радиолокатора МРЛ-2 и данных визуальных наблюдений для обнаружения гроз. Они показали, что вероятность правильного обнаружения гроз по мере увеличения расстояния от 100 до 300 км изменяется от 93% до 69% в Бресте, от 60,3% до

49,2% в Минске, от 58,3% до 39,3% в Гомеле и от 84% до 60% в Ленинграде. Так как методика обработки данных не предусматривала пункт «количество ложных тревог МРЛ» (случай, когда радиолокационная станция выдает ливни за грозы), то количество пропусков дополняет приведенные выше цифры до 100%. Применение в этих экспериментах данных регистрации гроз грозопеленгатором ПАГ-1 позволило пропущенные МРЛ-2 грозы перевести в распознанные (обнаруженные) в 7% - 31,3% случаев для Бреста, в 39,7% - 50,8% случаев для Минска, в 41,7% - 60,7% случаев для Гомеля и в 16% - 40% случаев для Ленинграда. Итоговыми документами, завершающими серию экспериментов по совместному использованию ПАГ-1 и МРЛ стали «Методические указания по применению грозопеленгатора ПАГ-1 совместно с МРЛ» и «Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2». Несмотря на очевидное преимущество совместного использования для распознавания гроз (грозовых очагов) МРЛ и ПАГ-1, а позже ОГПД «Очаг-2П», последние были практически выведены из сетевых наблюдений. До настоящего времени в отечественной практике наблюдения за опасными метеорологическими явлениями ведутся только с помощью сети МРЛ и наземных визуальных наблюдений метеорологическими станциями и постами.

Вторая глава посвящена результатам экспериментальных исследований погрешности измерения пеленга и дальности грозопеленгаторами и дальномерами различной конструкции.

В разделе 2.1. изложена методика измерений, приведены блок-схема измерительного комплекса с низким разрешением по времени и данные регистрации параметров электромагнитного излучения грозовых разрядов.

Измерительный комплекс был развернут в 1992 г. на полевой базе Главной геофизической обсерватории в п.Воейково. Он включал в себя макет широкополосного пеленгатора PV (0,3-30 кГц), разработанный ОКТБ «Радиофизика» и два широкополосных пеленгатора (0,3-3 кГц) PG1 и PG2, разработанные автором в ГГО. Для синхронизации измерений в комплексе аппаратуры использовались сигналы точного времени, принимаемые с помощью приемника Ч7-13 и синхронметра Ч7-15. Пеленгатор PG2 отличался по аппаратной части тем, что в нем отсутствовали режекторные фильтры (50 Гц), фильтры низких частот и устройство выборки-хранения. Этот эксперимент позволил сопоставить показания различных по своему аппаратному и программному обеспечению пеленгаторов. Серия измерений в лабораторных условиях позволила определить разности пеленгов ($\bar{\varphi}_{PG1} - \bar{\varphi}_{PV}$) и ($\bar{\varphi}_{PG2} - \bar{\varphi}_{PV}$), измеренных тремя пеленгаторами по сигналам имитаторов ОГПД "Очаг-2П" и пеленгатора PV, а также их стандартное отклонение σ_a^{PG1} и σ_a^{PG2} . Стандартные отклонения σ_a^{PG1} и σ_a^{PG2} приведены для первых трех квантующих импульсов АЦП пеленгаторов PG1 и PG2, через интервалы времени 5, 133 и 266 мкс. Значение пеленга по пеленгатору PV определялось только по максимуму первой полуволны формы ЭМИ

молний. В результате выявлена зависимость σ_a^{PG1} и σ_a^{PG2} от момента измерения (номера квантующего импульса). Для коротких сигналов имитатора ОГПД «Очаг-2П» σ_a^{PG1} изменяется от 1° до $7,8^\circ$, а σ_a^{PG2} от $2,3^\circ$ до $9,8^\circ$. Для более длинных сигналов имитатора пеленгатора PV σ_a^{PG1} изменяется от $0,7^\circ$ до $0,8^\circ$, а σ_a^{PG2} от $0,7^\circ$ до $3,0^\circ$. Различие значений σ_a^{PG1} и σ_a^{PG2} для сигналов имитаторов с разной длиной импульсов объясняется изменением соотношения сигнал/шум на различных участках, имитируемых аналоговых сигналов. Минимальные расхождения в показаниях пар пеленгаторов PV и PG1 наблюдаются при измерениях на переднем фронте сигнала. Данные статистической обработки результатов измерений пеленгаторами PV и PG1 показали, что суммарное стандартное отклонение σ_Σ^{PG1} в зависимости от уровня сигнала изменяется от $8,1^\circ$ при напряжении 2,5 мВ до $5,7^\circ$ при напряжении 250 мВ для измерений по первому квантующему импульсу и от $11,7^\circ$ при напряжении 2,5 мВ до $5,8^\circ$ при напряжении 250 мВ для измерений по второму импульсу, через 128 мкс. Увеличение суммарной погрешности σ_Σ^{PG1} по сравнению с аппаратурной σ_a^{PG1} объясняется погрешностью, обусловленной дополнительными шумами на выходах антенн и влиянием пространственной ориентации молниевых разрядов.

В разделе 2.2. изложена методика измерений, дано описание измерительного комплекса с высоким разрешением по времени, разработанные автором для приведения регистрации электромагнитного излучения грозových разрядов. Отличительной особенностью комплекса является быстрое действие (время оцифровки – до 1 мкс) и достаточно широкая от 0,3 до 60 кГц полоса частот. Для тестирования антенн и измерительного комплекса в целом, с целью определения возможных аппаратурных ошибок измерения пеленга по данным имитатора, кольца Гельмгольца устанавливались на радиопрозрачный колпак блока антенн. Это позволяло регистрировать суммарный сигнал, наводимый на антеннах, как внешними шумами, так и с помощью колец. В результате показано, что при соотношении сигнал/шум более 7 аппаратурная погрешность измерения пеленга σ_a широкополосным пеленгатором не превышает 2° , а при соотношении сигнал/шум более 25 - $\sigma_a < 1^\circ$.

Для определения суммарной погрешности измерения пеленга $\sigma_\Sigma^2 = \sigma_{то}^2 + \sigma_a^2$ были проведены синхронные измерения пеленгов двумя комплектами широкополосных пеленгаторов с рабочей полосой частот от 0.3 до 60 кГц в составе ОГПД «Алвес 01» и «Алвес 11», и комплектом узкополосного пеленгатора в составе ОГПД «Пеленг» с резонансной частотой 500 Гц. ОГПД «Пеленг» разработан с участием автора в 90-91 гг., а

ОГПД версии “Алвес 01” разработан автором в 92-93 гг. Результаты синхронных измерений двумя широкополосными пеленгаторами показали, что суммарное среднеквадратическое отклонение σ_{Σ} между их показаниями составляет $2,5^{\circ}$ - $3,9^{\circ}$. Среднее квадратическое отклонение пеленгов между широкополосным и узкополосным пеленгатором составило $8,4$ градуса. Оно совпадает по порядку величины с данными для пеленгаторов PV и PG1. Эксперименты, проведенные в грозовой сезон 1995 г. с помощью аналогичного комплекса, подтвердили эти цифры. Для более 14000 случаев синхронной регистрации грозовых разрядов широкополосными пеленгаторами ОГПД версии «Алвес 01» и «Молния11» (аналог «Алвес11») σ_{Σ} составило $2,5^{\circ}$ - $3,6^{\circ}$. Поскольку измерения пеленга в широкополосных пеленгаторах проводились при максимальных амплитудах первой полуволны сигнала и пеленгаторы регистрировали разряды разного типа (облако – земля и облако-облако), не исключено, что в некоторой степени полученные значения σ_{Σ} обусловлены и пространственной ориентацией каналов молний. Более наглядно влияние пространственной ориентации каналов молний выражено в данных синхронных измерений широкополосных с узкополосным пеленгатором. Для 1532 случаев синхронной регистрации грозовых разрядов пеленгаторами ОГПД версии “Алвес 01” и «Пеленг» $\sigma_{\Sigma}=7,6^{\circ}$ и для 1472 случаев синхронной регистрации грозовых разрядов пеленгаторами ОГПД версии “Молния 11” и «Пеленг» $\sigma_{\Sigma}=7,7^{\circ}$. Таким образом, суммарная средняя квадратическая погрешность σ_{Σ} для узкополосных пеленгаторов достигает 7° - 8° .

С методической точки зрения представляют интерес изменения величин пеленгов, их разностей и средние квадратические отклонения этих разностей в процессе изменения временной формы ЭМИ. Одна из версий программы-обработчика исходных файлов с данными оцифровки широкополосных сигналов ЭМИ молний, разработанная автором, формирует текстовые файлы, которые содержат дату, точное время, амплитуды составляющих ЭМИ молний, отношения амплитуд и пеленги, соответствующие максимальному значению большей из амплитуд магнитных составляющих. Дополнительно программа-обработчик может выводить в файл перечисленные выше параметры ЭМИ молний по пяти отсчетам до наступления максимума первой полуволны ЭМИ молний и практически по любому числу отсчетов за максимальным значением амплитуды первой полуволны. Обработка почти 32000 волновых форм ЭМИ молний зарегистрированных в 2004 году показала, что максимальное расхождение разности пеленгов не превышает $3,5^{\circ}$ во временном интервале между 5-м и 7-м отсчетами в той области, где наблюдаются максимальные значения амплитуд H_x и/или H_y составляющих. Основным источником погрешности измерений пеленга являются значительные шумы в приемниках пеленгаторов. Анализ данных показал, что для уменьшения средней квадратической погрешности измерения пеленга до 2-х и менее градусов необходимо выполнять следующие условия: число

разрядов АЦП должно быть не менее 12; время выборки не должно превышать одной мкс; полоса частот широкополосного пеленгатора должна быть более 50 кГц; измерение амплитуд N_x и N_y составляющих поля должно осуществляться на переднем фронте за 1-2 отсчета до максимума амплитуды первой полуволны, при условии, что соотношение сигнал/шум более 25.

В разделе 2.3. приведены результаты испытаний узкополосного амплитудного ЕН-дальномера «Пеленг» и широкополосного амплитудного Е-дальномера в составе ОГПД «Алвес01». Расчетным путем показано, что для регистрации 95% разрядов в грозовых облаках и ячейках, расположенных на расстоянии до 50 км, необходимо обеспечить такую чувствительность пороговых устройств пеленгаторов и дальномеров, чтобы они регистрировали разряды с расстояний 150 км и более. Соответственно для обеспечения аналогичной вероятности на расстояниях до 300 км ОГПД должен регистрировать сигналы с расстояний примерно 900-1000 км. Для определения радиуса обнаружения грозовых очагов и разрядов ОГПД «Пеленг» использовались данные визуальных наблюдений метеостанций и синоптических карт за 1993 г. Показано, что ОГПД «Пеленг» регистрирует грозы на расстояниях более 300 км. В радиусе 50 км вероятность обнаружения гроз составляет примерно 95%. Вероятность правильного обнаружения гроз в ячейках размером 10x10 км изменяется от 65% до 92 % в зависимости от времени наблюдений. При этом считается, что ячейка определена правильно при регистрации в ней 3-х и более разрядов за интервал времени 60, 30 или 15 минут. Погрешность в одну ячейку составляет 7%-30% и погрешность более, чем в одну ячейку, не превышает 12%. Для определения погрешности измерения дальности в зоне до 50 км ОГПД "Пеленг" использовались данные измерения расстояний до повторных ударов молний во вспышке. По ним вычислялись разности расстояний и среднее квадратическое отклонение. Например, общее число повторных разрядов, зарегистрированных в сезон 1993 г, составило 1020. Среднее значение отклонений между повторными ударами молний - 1.6 км, среднее квадратическое отклонение - 11.2 км. По экспериментальным данным средние размеры горизонтальной части молниевых разрядов в зависимости от стадии развития грозового облака изменяются от 4,4 км до 7,6 км, а среднее квадратическое отклонение составляет 1,6-4,4 км. Следовательно, среднее квадратическое отклонение разности измеренных значений расстояний между повторными разрядами определяется реальными размерами горизонтальной части молний и погрешностью измерения дальности дальномером ОГПД "Пеленг". Учет средних размеров молний показывает, что средняя квадратическая погрешность измерения дальности ОГПД «Пеленг» в зоне до 50 км составляет 4-6 км. Результаты синхронной регистрации молний ОГПД "Пеленг" и пеленгационной системой, построенной на базе ОГПД "Алвес 01", "Алвес 11" и широкополосного пеленгатора PV показали, что взаимная среднеквадратическая погрешность измерения дальности ОГПД и пеленгационной системой ПСМГ, в зоне до 50 км, составляет 7 км.

В грозовой сезон 1994 года на АМСГ а/п Ржевка проведены испытания ОГПД «Алвес 01». Цель испытаний состояла в определении зоны действия ОГПД и вероятности обнаружения гроз по отношению к данным визуальных наблюдений на метеосети. Результаты измерений координат молний ОГПД записывались на жесткий диск компьютера. Это позволило проводить их обработку по различным алгоритмам, в частности, изменять размеры ячеек, время накопления информации и алгоритмы измерения дальности и пеленга. В результате сравнения данных измерений ГПД по временным интервалам, в которые отмечались грозовые процессы в районе метеорологических станций в радиусе до 300-350 км, получены следующие данные. Для ячеек размером от 7x7 км до 30x30 км вероятность правильного обнаружения гроз изменяется от 51% до 81%. Вероятность погрешности в одну ячейку - от 22% до 15% и вероятность погрешности более, чем в одну ячейку - от 6% до 9%. Сравнение расстояний, измеренных амплитудным E-дальномером ОГПД «Алвес 01» и пеленгационной сетью (п.Воейково и г.Новгород) показало, что среднее квадратическое отклонение изменяется от 20 км до 30 км, а среднее смещение нуля шкалы около 6 км. Данные по вероятности обнаружения гроз ОГПД «Пеленг» и «Алвес 01» носят ориентировочный характер, так как эффективность метеорологической сети визуальных наблюдений низкая. Известно, что среднесуточная эффективность визуальных наблюдений не превышает 60%. Для обнаружения гроз с вероятностью 90 % в радиусе 300 км, по расчетам автора, необходимо расположить равномерно по площади не менее 200 метеостанций штормового оповещения. Приведенные выше результаты исследований подтвердили целесообразность разработки и внедрения пассивных средств грозопеленгации. Разработанный автором ОГПД «Алвес 01» и его модификации могут найти применение в национальных грозопеленгационных сетях и в комплексах местоопределения грозовых очагов совместно с активными средствами измерений - МРЛ.

В разделе 2.4. приводятся оригинальные данные исследования временных и пространственных изменений амплитудных параметров ЭМИ грозовых разрядов в полосе частот 0,3-60 кГц. При прохождении грозовых очагов в зоне до 30-50 км от пункта наблюдений отмечается увеличение модулей максимальных значений отношения амплитуд электрической E_z и магнитных H_{xy} составляющих ЭМИ грозовых разрядов $K(t,R)=|E_z / H_{xy}Z_0|$. Впервые на это было обращено внимание после построения суточного хода параметра $K(t,R)$. На рис.2, для примера, показан суточный ход параметра $K(t,R)$ для грозовых разрядов, зарегистрированных ОГПД «Алвес 01» в п. Воейково 24.07.93 г. На рис.2 для сравнения приведен аналогичный суточный ход параметра $K(t,R)=|E_z / H_{xy}Z_0|$, полученный при регистрации гроз ОГПД «Пеленг» с резонансной частотой 500 Гц. Средние значения $K(t,R)$ и $K(t,R)$, вычисленные за 30 минутные интервалы измерений, коррелируют между собой (коэффициент корреляции 0,9). В спектральной области, для вертикального электрического диполя, отношение модулей амплитуд

электрической и магнитных составляющих можно записать следующим образом:

$$K(f, R) = |Ez / HxyZ_0| = \sqrt{(a^4 - a^2 + 1) / a^4 + a^2}, \quad (4)$$

где: $a = \sqrt{R/47,7}$; f – частота в кГц; R – расстояние в км; $Z_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2}$; μ_0 и ϵ_0 – магнитная или электрическая постоянные вакуума. Эта зависимость используется для определения расстояния ОГПД «Пеленг» на резонансной частоте 500 Гц. На рис.3 приведен пример распределения по расстоянию и по времени грозовых очагов по данным МРЛ-5 (п. Воейково) и грозовых разрядов по данным ОГПД «Алвес» и ПСМГ за 19.05.04 г. Расстояния до грозовых разрядов по данным ОГПД «Алвес» вычислено с помощью простого соотношения $R = A/K(t, R)$, где коэффициент A зависит от чувствительности каналов приемников ОГПД и подбирается при сопоставлении расстояний, полученных разными методами. В данном эксперименте $A = 50$, что примерно соответствует рассчитанным по формуле (4) значениям параметра $K(f, R)$ на частоте 1,25 кГц. В разделе приводятся результаты анализа изменчивости параметра $K(t, R)$ по времени и по мере изменения расстояния. Показано, что значения параметра $K(t, R)$ более устойчивы вблизи максимальных значений амплитуд составляющих поля, что соответствует максимальным значениям соотношения сигнал/шум.

Изменение во времени модуля отношения максимальных амплитуд электрической и магнитных составляющих ЭМИ молний, зарегистрированных широкополосным ОГПД "Алвес01" и узкополосным ОГПД "Пеленг" в п.Воейково 240783г.

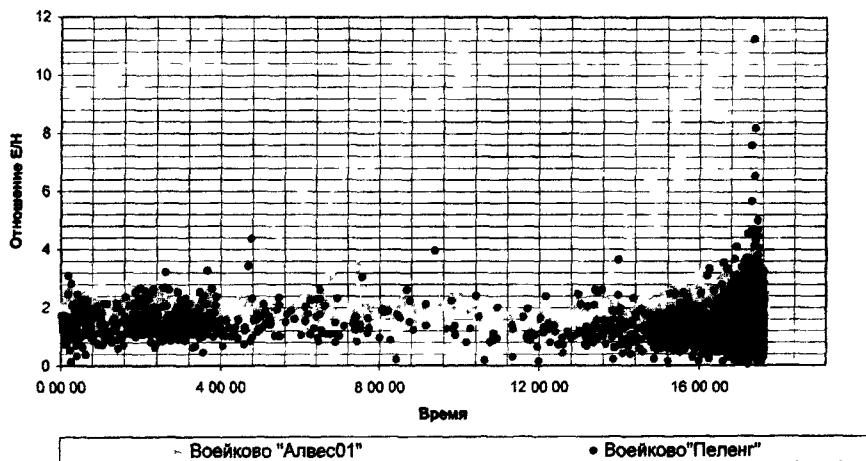


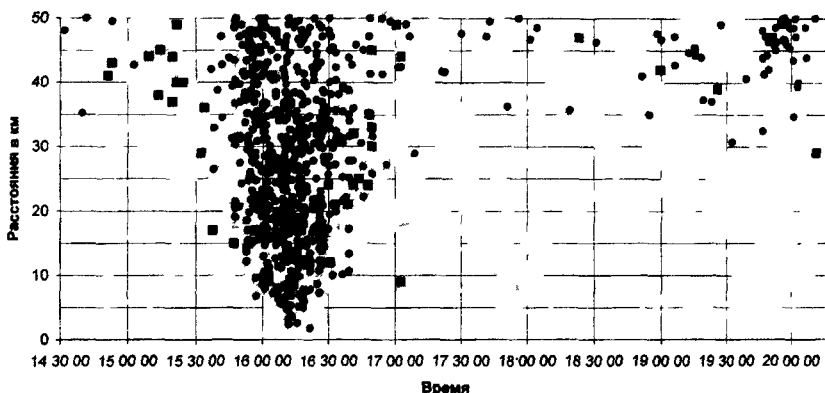
Рис.2

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований вероятности распознавания грозовых очагов радиолокационно-пеленгационным методом с помощью разработанного аппаратно-

программного комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активными и пассивными средствами измерений.

В разделе 3.1. изложена методика обработки данных полученных аппаратно-программным комплексом местоопределения грозовых очагов. Пассивная часть аппаратно-программного комплекса ОГПД версии «Алвес 2» включает в себя регистратор ЭМИ молниевых разрядов с программным обеспечением «Алвес 2.1». Эта программа управляет блоками аналого-цифровых преобразователей, формирует файлы, аналогичные версии ОГПД «Алвес 01», содержащие цифровую информацию об амплитудных параметрах

Расстояния до грозовых разрядов по данным ОГПД "Алвес01", ПСМГ и расстояния до зон максимальной отражаемости по МРЛ за 190504 Воейково



Расстояния до зон максимальной отражаемости по МРЛ 190504 ● Расстояния по АЕН ■ ПСМГ

Рис.3.

ЭМИ молний, точного времени. Дополнительно она проводит контроль времени поступления синхроимпульсов с порогового устройства блока аналоговой обработки сигналов и времени записи данных в файл. Программное обеспечение активной части комплекса «Мерком» формирует файлы, содержащие цифровую информацию о радиолокационной отражаемости облаков на уровнях $Lg(z) > -1,0$ по ячейкам 4×4 км. Файлы с МРЛ по каналам связи поступают на сервер ОГПД и объединяются. Для определения вероятностных характеристик распознавания грозовых очагов МРЛ использовались четыре варианта обработки данных.

1. ОГПД работает как грозопеленгатор в зоне до 200 км, а МРЛ как дальномер. В этом случае программа за время наблюдений МРЛ (полный сеанс не превышает 4-х минут) выбирает ячейки с большей отражаемостью по каждому пеленгу на грозовые разряды, независимо от дальности измеренной грозодальномером, и периметр таких ячеек выделяет красным цветом.

2. ОГПД работает как грозопеленгатор-дальномер, который в зоне до 200 км формирует ячейки размером 30×30 км. Если в ячейку за сеанс

наблюдений МРЛ попадает два и более грозových разрядов, то программа выделяет периметр таких ячеек красным цветом. ОГПД программно не совмещен с МРЛ.

3. ОГПД работает как грозопеленгатор-дальномер совмещенный программно с МРЛ. В зоне до 200 км он формирует ячейки размером 30x30 км, если в них наблюдается радиоэхо. Если в ячейку за сеанс наблюдений МРЛ попадает один и более грозových разрядов, то программа выделяет периметр таких ячеек зеленым цветом.

4. ПСМГ работает независимо от МРЛ. В зоне до 100 км данные ПСМГ в виде крестиков наносятся на карту.

Правильно распознанными с помощью МРЛ считались те грозовые очаги $R_{распГР}$, которые независимо от вероятности распознавания по критерию грозоопасности «У» (30-70% знак (R), 70-90% - R) и 90% -R) совпадали с данными пассивных радиотехнических средств наблюдений (ОГПД или ПСМГ). Ложными тревогами $R_{лтр}$ считались те случаи, когда МРЛ отмечал грозы независимо от вероятности распознавания по критерию грозоопасности «У», а пассивные средства их не регистрировали. К пропускам гроз $R_{пр}$ относились случаи, когда грозовые процессы наблюдались только пассивными средствами.

В разделе 3.2. приведены результаты исследования вероятности правильного распознавания гроз МРЛ по отношению к данным пеленгатора ОГПД учитывающего наличие зон радиоэхо по МРЛ до 200 км.

В разделе 3.3. приведены результаты исследования вероятности правильного распознавания гроз МРЛ по отношению к данным пеленгатора-дальномера ОГПД с учетом и без учета зон радиоэхо МРЛ.

В разделе 3.4. приведены результаты исследования вероятности правильного распознавания гроз МРЛ по отношению к данным ПСМГ.

Первый опыт сравнения показал (данные за 19 мая 2004, Рис.4), что вероятность правильного распознавания гроз МРЛ $R_{распГР}$ относительно данных ОГПД и ПСМГ составила только 23% и 20%, а вероятность ложных тревог достигала 74% и 78%. Если обратиться к рис.3, то можно увидеть, что даже на удалении до 50 км после 17 часов 19.05.04 г. МРЛ наблюдает значительное количество неподтвержденных пассивными средствами измерений грозových облаков. После корректировки параметра грозоопасности, обработка более 2000 сеансов наблюдений за грозами показала, что вероятность правильного распознавания гроз МРЛ, относительно пассивных средств наблюдений, значительно увеличилась, но она меняется не только в разные дни, но и в пределах одного грозового дня. Например (рис.4), по данным за ночные часы (МРЛ+ПСМГ за 020904 г.) вероятность правильного распознавания гроз $R_{распГР} = 77\%$, соответственно ложные тревоги $R_{лтр} = 18\%$, а пропуски $R_{пр} = 5\%$. За весь день $R_{распГР}$ составило 63% и соответственно $R_{лтр} = 32,0\%$, $R_{пр} = 5\%$. Общее число ложных тревог изменилось почти в 2 раза. В разделе показано, что применение

пассивных радиотехнических средств местоопределения грозových разрядов позволяет повысить вероятность распознавания гроз МРЛ на 25-30%.

В четвертой главе рассмотрены предложения по оснащению грозопеленгационной сети Росгидромета.

Предлагается создать малобазовые, с зоной до 300 км, грозопеленгационные сети в Северо-западном, Центральном и Южном Федеральных округах. Рассматривается вариант совмещения их с сетью радиолокационных станций. Оснащение сети возможно отечественным аппаратно-программным обеспечением на базе пеленгаторов ОГПД «Алвес».

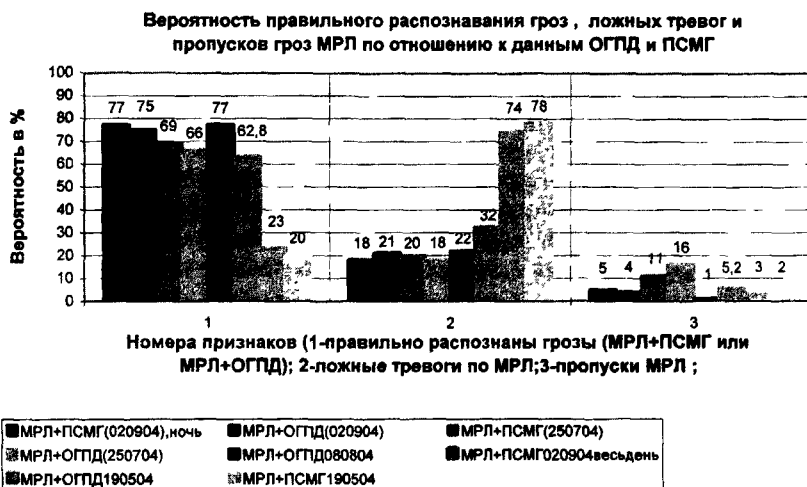


Рис.4

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Обобщены материалы по вероятностным характеристикам распознавания гроз МРЛ в сравнении с данными визуальных наблюдений наземных метеорологических станций. Показано, что вероятность правильного распознавания грозových облаков МРЛ не превышает 80%-85%.

2. Разработаны новые версии аппаратно-программного обеспечения для исследования амплитудных параметров электромагнитного излучения молний с низкой (до 128 мкс) и высокой (до 1мкс) разрешающей способностью по времени. Проведены экспериментальные исследования временных форм ЭМИ молний, зарегистрированных в полосе частот от 0,3 до 60 кГц. Показано, что значения амплитуд и отношения амплитуд составляющих E_z и H_{xy} излучения молний, измеренные в соседних точках временных форм хорошо коррелируют между собой по мере приближения к

максимальным значениям. Когда соотношение сигнал/шум более 10, коэффициент корреляции возрастает до 0.95.

3. Экспериментально исследована погрешность измерения пеленга широкополосными (полоса частот от 0,3 до 60 кГц) и узкополосным (резонансная частота 0,5 кГц) пеленгаторами с помощью имитаторов, в том числе, колец Гельмгольца. Показано, что аппаратная погрешность измерения пеленга не превышает одного градуса при соотношении сигнал/шум более 25. Погрешность минимальна при измерениях на переднем и заднем фронте сигналов в интервале 4-8 мкс от максимума амплитуды магнитной составляющей поля. Синхронная регистрация гроз широкополосными и узкополосным пеленгаторами выявила расхождение в показаниях широкополосных пеленгаторов. Для них среднее квадратическое отклонение составило $3-4^{\circ}$, а для широкополосного и узкополосного пеленгаторов $7-8^{\circ}$. Увеличение среднеквадратического отклонения во втором случае обусловлено влиянием пространственной ориентации каналов молний.

4. Экспериментально исследованы погрешности измерения дальности грозодальномерами. Для оценки погрешности использовались данные о расстояниях до повторных ударов в грозовом разряде. Показано, что средняя квадратическая погрешность измерения дальности узкополосным дальномером с рабочей частотой 0,5 кГц в зоне до 50 км равна 4-6 км. Близкое значение погрешности, ~ 7 км, получено при сравнении данных синхронных измерений узкополосным пеленгатором и пеленгационной системой местоопределения грозовых разрядов. Сравнение расстояний, измеренных амплитудным E-дальномером ОГПД «Алвес 01» и пеленгационной сетью показало, что среднее квадратическое отклонение изменяется от 20 до 30 км.

5. Разработаны однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры с программным обеспечением «Пеленг» и «Алвес». Последний с 1993 года используется в режимных наблюдения НИЦ ДЗА в п.Воейково. Реализованные версии широкополосного ОГПД могут использоваться автономно и в составе малобазовых, с зоной действия до 200-300 км, многопунктовых систем местоопределения гроз, а так же в системах штормового оповещения совместно с МРЛ.

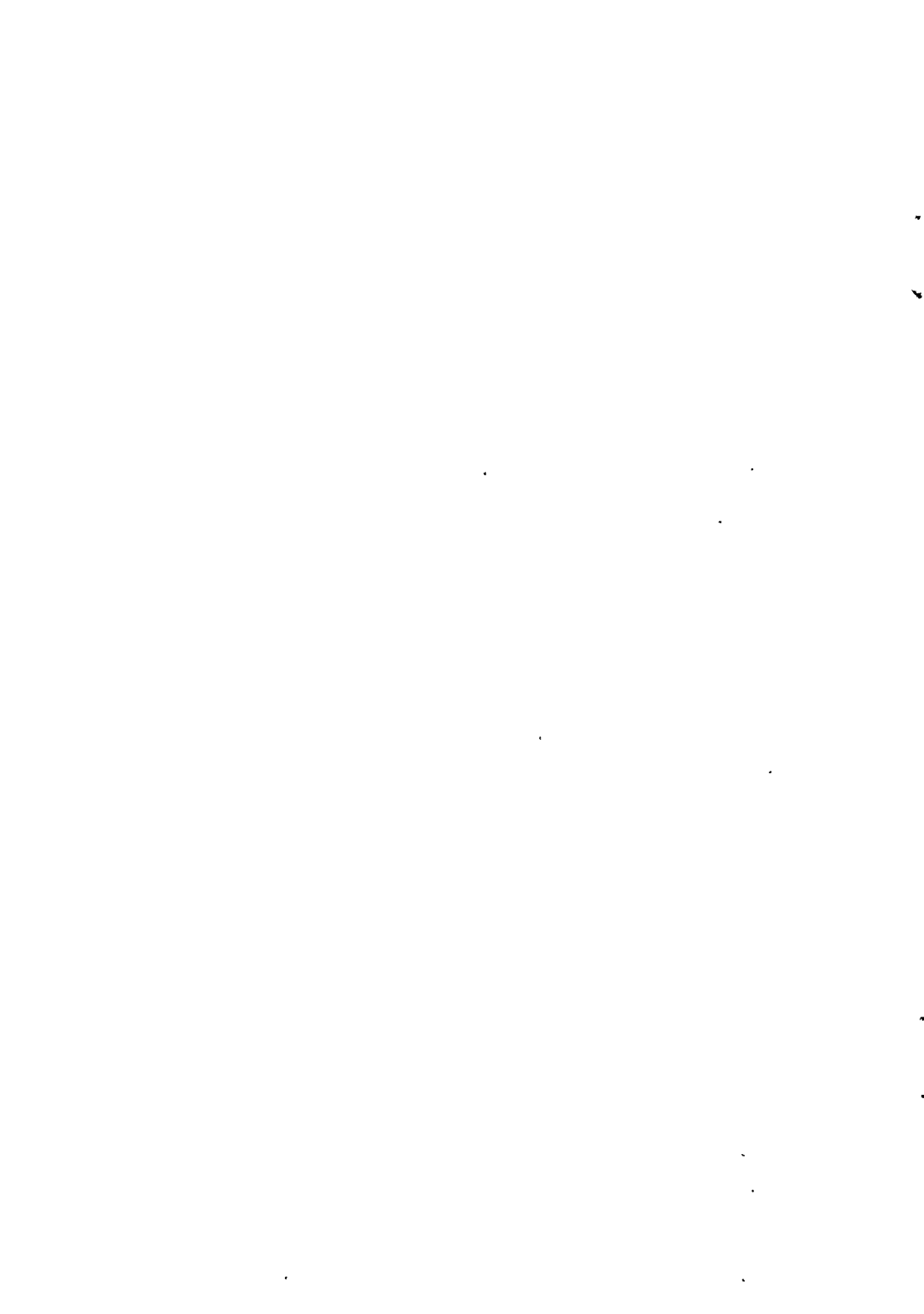
6. Впервые разработано аппаратно-программное обеспечение комплекса местоопределения грозовых очагов совместно активным (МРЛ-5) и пассивными (ОГПД «Алвес», ПСМГ) средствами измерений. В 2004-2005 гг. проведены совместные наблюдения за грозовыми процессами на базе НИЦ ДЗА, филиала ГГО им.А.И.Воейкова. Экспериментально показано, что применение пассивных средств регистрации гроз позволяет скорректировать вероятность распознавания гроз МРЛ на 25-30%.

7. Разработаны предложения по оснащению сети пеленгации гроз Росгидромета.

Публикации автора по теме диссертации

1. Snegurov A.V. One station range and direction finding. /Konovalov M.V., Romanchnko A.A., Snegurov V.S.//, Proc.9th Int. Conf. On Atm. Electricity.- St.Petersburg, 1992, v. 1, p.287-291.
2. Снегуров А.В. Грозопеленгатор-дальномер для систем метеобеспечения /Огуряева Л.В., Снегуров В.С., Шукин Г.Г.// Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО), СПб. Гидрометеиздат, 2001, вып. 3(549), с.190-199.
3. Снегуров А.В.К программе построения грозопеленгационной сети Росгидромета. /Снегуров В.С., Шукин Г.Г.// Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО),СПб. Гидрометеиздат,2004, вып. 5(553), с.207-222.
4. Снегуров А.В. Результаты испытаний амплитудного электромагнитного грозодальномера. /Снегуров В.С., Шукин Г.Г.// Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО), СПб., Гидрометеиздат, 2005, вып6 (554), 156-162.
5. Снегуров А.В. Опыт совместных наблюдений за грозами грозопеленгатором-дальномером и метеорологическим радиолокатором. /Снегуров В.С., Шаповалов А.В., Шукин Г.Г.// Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО), в печати.
6. Снегуров А.В., Снегуров В.С. К методике исследования временных форм близких атмосфериков.// Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО), 2005, в печати.





Заказ № 312

Отпечатано в ООО“КОПИ-Р”, ул., Колокольная, 12

Подписано к печати 14.12.2005 г. Тираж 100 экз. .

№ 26 277

РНБ Русский фонд

2006-4

28192