

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
федерального исследовательского центра «Якутский научный центр»

На правах рукописи



Шабаганова Светлана Николаевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА
ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ ЯКУТИИ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и
изделий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
Козлов Владимир Ильич

Якутск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Общие принципы мониторинга грозовой активности и методов выделения грозowych областей.....	9
1.1 Методы мониторинга грозовой активности.....	9
1.2 Статистические методы моделирования грозowych очагов.....	18
1.2.1 Меры сходства.....	21
1.2.2 Алгоритмы кластеризации.....	24
1.3 Грозowych процессы.....	26
1.4 Статистические методы определения параметров грозовой активности.....	30
1.5 Параметры грозowych ячеек и очагов.....	35
2. Методическое обеспечение для региональной системы мониторинга грозовой активности.....	38
2.1 Анализ погрешностей определения грозowego разряда.....	44
2.2 Построение рабочей зоны контроля за грозовой активностью.....	56
2.3 Метод оптимального определения местоположения грозowego разряда для двухпунктовой системы регистрации гроз.....	58
2.4 Метод выделения грозowego очага.....	60
2.5 Первичная кластеризация грозowych объектов методом ближайшего соседа.....	63
2.6 Модальный анализ Уишарта для выделения грозowych ячеек в случае их перекрытия	65
2.7 Параметры грозowego очага.....	70
3. Параметры кластерной модели грозowego очага.....	73
3.1 Вычислительная реализация метода выделения грозowego очага.....	73
3.2 Реализация основных вычислительных процедур и функций.....	75
3.3 Описание работы программы кластеризации грозowych разрядов.....	76
3.4 Пространственно-временные характеристики грозовой активности	80

3.5	Параметры пространственно-временных характеристик грозового очага...	83
3.6	Параметры пространственно-временных характеристик грозовой ячейки...	94
4.	Практические рекомендации по применению метода комплексного мониторинга грозовой активности в исследуемом регионе	103
4.1	Требования к регистрирующей аппаратуре.....	104
4.2	Технология метода определения местоположения грозового разряда на основе данных двухпунктовой системы грозолокации для исследуемого региона	108
4.3	Технология метода обработки массива зарегистрированных грозовых разрядов.....	108
	Основные научные результаты и выводы	111
	Библиографический список	113
	Приложение I.....	129
	Приложение II.....	130
	Приложение III.....	131
	Приложение IV.....	132
	Приложение V.....	138
	Приложение VI.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Грозы – это опасное природное явление, приводящее к возникновению чрезвычайных ситуаций, в результате которых гибнут люди, и наносится ущерб многим сферам человеческой деятельности, таким как электроэнергетика и лесное хозяйство. Одна из основных причин возникновения лесных пожаров в Якутии – это грозовые разряды.

Якутия относится к одному из наиболее пожароопасных регионов России. Согласно данным Якутской авиационной базы охраны лесов количество лесных пожаров, вызванных грозовой активностью составляет 14% в густонаселенной части Якутии и 70% в малонаселенных районах.

Лесные пожары оказывают огромное влияние на окружающую среду. Крупномасштабные лесные пожары наносят разрушительное воздействие на природные и искусственные экосистемы, при этом в атмосферу выбрасывается огромное количество продуктов горения, загрязняющих атмосферу и способствующих глобальному изменению климата.

В связи с этим необходимо совершенствовать методы регистрации грозы и методы выделения грозовых объектов с целью выявления закономерностей эволюции грозовой активности и прогнозирования особенностей развития и интенсивности грозовой деятельности.

Исходя из вышеизложенного, становится актуальной задача усовершенствования методов мониторинга грозовой активности.

Степень научной проработанности темы. Вопросам совершенствования радиотехнических методов мониторинга грозовой активности посвящены работы как российских, так и зарубежных специалистов, таких как М. С. Александров, В.

Н. Стасенко, И. И. Кононов, А. Х. Аджиев, R. H. Holzworth, R. H. Dowden, M. L. Hutchins и др.

Вопросам кластеризации грозовых разрядов уделяется большое внимание в работах З. М. Бакленевой, В. П. Горбатенко, А. А. Аджиевой, В. И. Козлова. В обзорной работе Е.А. Мареева показано, что большое значение имеет изучение региональных особенностей статистики молний и совершенствование наземных средств картирования гроз.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с пунктами 1, 4, 5 паспорта специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (технические науки).

Объект исследования – грозовая активность отдельного региона.

Предмет исследования – пассивные радиотехнические методы регистрации импульсного сигнала атмосферы, методы кластерного анализа грозовых разрядов.

Цель диссертационной работы. Разработка методов мониторинга грозовой активности Якутии.

Задачи исследования:

1. Разработать метод местоопределения грозового разряда, повышающий точность определения его координат, на основе двухпунктовой системы грозопеленгации.

2. Разработать метод построения модели грозового очага в виде кластера, объединяющего грозовые разряды, и реализовать данный алгоритм в виде программного комплекса.

3. Определить и оценить основные параметры различных грозовых областей, интерпретируя натурный эксперимент для исследуемого региона на основе разработанных методов.

4. Выявить новые закономерности, характеризующие грозовые очаги для трех регионов Якутии.

Научная новизна работы:

1. Разработан новый метод местоопределения грозового разряда отличающийся тем, что повышает точность определения координат грозового разряда при использовании двухпунктовой системы грозорегистрации.

2. Разработан метод выделения грозового очага, в виде кластера отличающийся тем, что позволяет классифицировать объекты, в случае перекрывающихся грозовых областей.

3. Впервые установлено, что на территории Якутии форма грозовых объектов является эллиптической и с увеличением эксцентриситета (вытянутости грозового кластера) растет интенсивность грозы.

4. Впервые установлены закономерности, характеризующие грозовые объекты различных регионов Якутии и позволяющие прогнозировать грозовую активность для региональных систем экологического мониторинга гроз.

Практическая значимость заключается в том, что информация о грозовых очагах и ячейках, полученная с помощью разработанных алгоритмов и методов, позволит получить уточненные сведения о региональной грозовой активности необходимые для служб пожарной охраны леса, при проектировании и эксплуатации магистральных объектов, в службах метеорологического обеспечения безопасности полетов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод местоопределения грозового разряда, повышающий точность определения координат и времени прихода, основанный на алгоритме вычисления дальности в зависимости от углов прихода атмосфериков.

2. Методы кластеризации грозовых разрядов для выделения грозового очага.

3. Программный комплекс кластеризации грозовых разрядов, реализующий алгоритмы построения модели грозового очага и нахождения его параметров для мониторинга грозовой активности.

4. Новые закономерности, характеризующие грозовые объекты различных регионов Якутии.

Достоверность полученных результатов подтверждается физическим обоснованием предложенных методов, тестированием алгоритмов и программ, их проверкой вычислительными и натурными экспериментами. Полученные результаты находятся в качественном и количественном согласии с данными независимых исследований, опубликованными ранее другими авторами.

Реализация результатов работы. Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства» Политехнического института (ф) Северо-Восточного Федерального Университета им. М. К. Аммосова в г. Мирном, а также в лаборатории радиоизлучения ионосферы и магнитосферы Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН при решении научно-исследовательских задач.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

1. VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (г. Томск, 2009 г.);
2. I всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире» (г. Мирный, 2009 г.);
3. XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-15 (г. Томск, 2009 г.);
4. X межрегиональная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Нерюнгри, 2009 г.);
5. Конференция, посвященная Дню науки, среди молодых ученых и аспирантов ИКФИА СО РАН (г. Якутск, 2009 г.);
6. Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире (г. Мирный, 2011);
7. VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (г. Санкт-Петербург, 2012 г.);

8. XVIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Иркутск, 2012 г.).

9. Конференция научной молодежи ИКФИА "Актуальные вопросы космофизики (г. Якутск, 2019 г.).

Результаты работы докладывались на семинарах Института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН и Северо-Восточного Федерального Университета им. М. К. Аммосова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них в рецензируемых журналах 6, в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus 2 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации являются самостоятельными и получены лично автором. Установка грозопеленгатора в г. Мирном, его эксплуатация и обработка данных грозопеленгатора была проведена автором данной работы. Автору принадлежит разработка методики для выделения грозовых очагов и ячеек, проектирование структуры и создание программного комплекса. Постановка задач, обсуждение результатов применения методов проводилась совместно с научным руководителем, а подготовка публикаций – с соавторами работ.

1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ И МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРОЗОВЫХ ОБЛАСТЕЙ

1.1 Методы мониторинга грозовой активности

Современные радиотехнические системы местоопределения молниевых разрядов формируются в двух направлениях [1]. При использовании радиолокационных (активных) методов используют рассеяние электромагнитных сигналов от ионизированного канала, образованного молниевым разрядом. Радиолокационные методы позволяют определить пеленг (азимут) и дальность в пределах прямой видимости грозы. Радиус обнаружения сигнала ограничен кривизной Земли и высотой молниевых каналов.

Электромагнитное излучение молниевых разрядов распространяется на большие расстояния и действует в широкой полосе частот [1]. В ОНЧ-диапазоне в интервале от 30 герц до порядка 30 кГц, радиосигналы имеют пик интенсивности и сигналы распространяются с небольшим затуханием (3 дБ на 10000 км). При использовании пассивных методов локации гроз [2, 3, 4, 5, 6] фиксируют импульсное очень низкочастотное электромагнитное излучение молниевых разрядов (атмосферика). Атмосферик представляет собой импульсное электромагнитное излучение, вызываемое разрядными токами электростатических полей грозных облаков [7]. Благодаря этому, наземные наблюдения за грозами радиотехническими методами проводят с помощью антенных систем, принимающих импульсные сигналы радиошумов от разрядов молний [1, 8]. Фиксация грозового разряда производится путем регистрации координат и времени прихода атмосферика.

Пассивные методы регистрации гроз реализуются в виде однопунктовых [9, 10, 11, 12, 13] и многопунктовых [14, 15, 16, 17] радиотехнических систем грозолокации, различные методики исполнения которых, применяются в настоящее время повсеместно.

Для того, чтобы реализовать любую однопунктовую систему регистрации гроз, прежде всего, необходимо решить задачи определения направления прихода (пеленга) сигнала и определения дальности до него [4, 18].

Импульсные антенные системы используются для обнаружения радиосигналов молниевых разрядов в радиусе до 350 км при широкополосных и узкополосных методах измерения [2, 3, 7, 10, 14, 18].

Для обнаружения грозовых разрядов из нескольких пунктов, начиная с 20 – 30-х годов прошлого века, в устройстве регистратора гроз использовались рамочные антенны, несколько позже замененные магнитными.

Амплитудно-фазовые грозопеленгаторы получили распространение середине прошлого века. Их устройство позволило обрабатывать радиосигналы, принятые с электрической и магнитной антенн, и однозначно определять радиопеленг молниевых разряда.

Механизм определения направления принятого радиосигнала заключается в анализе соотношений между основными волновыми характеристиками между сигналами, полученными от ортогональных рамочных антенн, одна из которых ориентирована в направлении запад-восток, а другая – север-юг. Определяя знаки полувольт электрической и магнитных компонент поля, устраняется неоднозначность в определении направления прихода. Для проведения этой трудоемкой процедуры, необходимо измерять относительные изменения фаз узкополосных сигналов электрической и магнитной составляющих поля, которые зависят от многих факторов, в том числе от динамических перегрузок в измерительных каналах, пространственной ориентации каналов молний и расстояния до молниевых разрядов.

На основании синхронных измерений радиопеленга амплитудным грозопеленгатором и при помощи визуального метода в ближней зоне до 15 км была выявлена погрешность в 5° [14].

При синхронных измерениях пеленга на молниевые разряды амплитудно-фазовым пеленгатором и разностно-дальномерной системой местоопределения гроз [2] на различных расстояниях от 25 км до 175 км была проведена оценка ошибок пеленгования и установлено, что средняя квадратичная ошибка в среднем принимала значение 6^0 и не зависела от дальности.

Увеличение вычислительной мощности анализаторов радиосигналов позволило уменьшить поляризационные ошибки определения направления прихода сигнала, связанные с изменением пространственной ориентацией разрядов и уйти от узкополосных методов измерения пеленга к широкополосным методам. При этом преимущества широкополосных методов очевидны:

- уменьшение времени обработки широкополосных сигналов,
- увеличение быстродействия анализаторов дает возможность проводить измерения на фронте сигнала, что исключает влияние отраженного от ионосферы сигнала в ближней зоне;
- повышение информативности измерений;
- регистрация повторных ударов молний в землю;

При этом погрешность определения направления прихода пеленгаторов, использующих широкополосные методы, составляет менее 2-х градусов [5] и позволяет уверенно регистрировать электромагнитные импульсы молниевых разрядов в зоне до 300 км. Так, например, точность определения направления прихода по данным [19] составляет около $\pm 2,5^\circ$.

Грозовые разряды делятся на внутриоблачные и наземные. Точное определение координат наземных грозовых разрядов позволяет предупредить ущерб от аварийных отключений линий электропередач и повреждения кабельных линий связи, от возникновения лесных пожаров [20].

Для того чтобы выделить наземные разряды в системах регистрации гроз анализируется форма принимаемого сигнала [1]. Подавляющее большинство

методов разделения наземных и внутриоблачных грозových разрядов базируются на различии спектральных характеристик их радиосигналов. В работах [4, 21] проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных спектров близких радиосигналов, порожденных разрядами облако-земля (О-З) и облако-облако (О-О), выявление соотношения амплитуд электромагнитного поля на разных частотах и оценка устойчивости спектральных характеристик атмосфериков.

По результатам исследования спектров радиоизлучения типа О-З в [4] выделяется класс (80% от количества зарегистрированных) таких атмосфериков, что их спектр на расстояниях до 5 км от источника, принимаемый обычно за спектр источника, имеет плавное уменьшение интенсивности излучения по мере увеличения частоты и незначительную осцилляцию на частотах [8] от 5 кГц до 10 кГц. Это спектр стандартного источника [8, 22].

Рост высокочастотных компонент сигнала создает вторичный максимум, соответствующий частотам около 4 кГц, и минимум, соответствующий частотам около 2,5 кГц, на расстояниях более 30 км. В [22, 23] также отмечается возникновение минимума в диапазоне частот от 1,5 кГц до 3 кГц в спектральных кривых на удалениях порядка 500 км в диапазоне ОНЧ.

Следовательно, метод селекции разрядов О-З и О-О построен на том факте, что для 80% регистрируемых атмосфериков от разрядов О-З в спектре, начиная с удаления до 30 км, появляется понижение на частотах 1,5-2 кГц, которое по мере удаления от источника увеличивается [8]. Проведенный в [23] анализ атмосфериков, зарегистрированных на расстояниях около 30 км, показал, что амплитуда частотных [8] компонент для разрядов О-З превосходит амплитуду для разрядов [8] О-О на частотах меньших 6-8 кГц, а выше – наоборот. Более подробно метод показан в [8, 21].

Каждый из методов однопунктовой дальнометрии обладает рядом преимуществ, но, при большом числе их вариаций, нет такого метода, который отвечал бы требованиям по отсутствию ограничений на радиус действия, скорости обработки и высокой точности принимаемых данных [2].

В работе [24] предложено производить нахождение дальности грозового разряда до источника по композиции признаков, объединяя результаты, применяя несколько методов путем нахождения среднегеометрического признаков. Здесь [8] допущено предположение, что погрешность определения расстояния пропорциональна его величине [8].

Однопунктовые грозопеленгаторы и дальномеры получили широкое распространение и большое разнообразие, они относительно просты в изготовлении и эксплуатации, но при этом не удовлетворяют многих потребителей по причине невысокой точности определения расстояния до молниевых разрядов [25]. При этом, несмотря на отсутствие совершенных методик определения пеленга и дальности до грозового разряда, однопунктовые грозопеленгаторы – дальномеры позволяют получать оперативную информацию о грозовой деятельности [26] с большой территории (в среднем до 600 км) и выделять при усреднении зоны повышенной активности.

Начиная с начала этого века, наиболее прикладной характер имеют большебазовые многопунктовые системы местоопределения локаций гроз [14, 16, 17, 27, 28]. Такие системы бывают различных исполнений, в том числе: пеленгационные, в которых линии положений определяются значениями пеленгов на излучатель (минимальное число пунктов – не менее двух); разностно-дальномерные системы, в которых линии положений гиперболы определяются величиной разностей времен прихода сигнала в разнесенные пункты системы [29]; гибридные системы, использующие линии положения различного типа.

В 1970-х годах усилия исследователей и разработчиков [30], направленные на существенное улучшение точности локации и эффективности обнаружения сигнала, привели к разработке новой версии широкополосного пеленгатора, который применялся при постановке многопунктовой системы [31]. С помощью улучшенной версии пеленгатора практически полностью были исключены поляризационные ошибки пеленгования, обусловленные наклоном излучателя, что позволило довести точность пеленгования до 1° . Однако, ограничения, связанные с допустимыми значениями соотношения сигнал/шум, привели к

уменьшению размеров базовых расстояний между пунктами регистрации до 400 и менее километров и, соответственно, к существенному увеличению их числа при обслуживании значительных территорий. Так национальная сеть локации гроз NLDN (National lightning detection network) на основе малобазовых многопунктовых пеленгационных систем, расположенная на всей территории США, включала в себя несколько десятков пунктов регистрации. К настоящему времени национальная сеть обнаружения молний состоит из более чем 100 удаленных наземных станций зондирования. Здесь, как отдаление, так и сближение пунктов приводит к возникновению ошибок пеленгования, поэтому эта система подверглась нескольким модификациям и обновлениям, направленным на увеличение точности и эффективности обнаружения молниевых сигналов.

Молниевые сигналы поступают через спутниковую связь в центр управления, после этого центральные анализаторы преобразуют полученные сигналы в информацию, пригодную конечным пользователям. Выходными данными являются сведения о местоположении, времени, полярности грозового разряда.

Примером разностно-дальномерной системы может служить коммерческая система LPATS (Lightning positioning and tracking system), развернутая в 1980-х годах в США. Подобные многопунктовые системы используются также в странах Северной и Южной Америки, Австралии, в большинстве стран Европы и ряде стран Азии.

В настоящее время задача повышения точности определения координат грозового разряда все также актуальна. Достижения последних лет в синхронизации временных шкал в разнесенных пунктах с субмикросекундной точностью и возможности квантования сигналов с наносекундной дискретизацией позволяют успешно решать техническую сторону задачи их временной привязки. При этом остаются серьезные проблемы выбора характерной точки сигнала, наименее подверженной влиянию различиям эффектов распространения над

трассами различной протяженности и ее однозначной идентификацией в разнесенных пунктах, по-разному отстоящих от излучателя.

В настоящее время примером большебазовой многопунктовой системы локации молний является мировая сеть, организованная по инициативе профессора Ричарда Даудена под руководством профессора Holzworth. Сеть включала в себя на ранних этапах 25 приемных пунктов регистрации сигналов атмосфериков WWLLN (World Wide Lightning Location Network) [32, 33]. В настоящее время количество пунктов этой сети приближается к семидесяти по всему миру для обнаружения сферической активности в диапазоне VLF [34].

Точность локализации молний в системе WWLLN зависит от точности определения времени прихода атмосферика в приемный пункт. Для этих целей используются сигналы GPS, которые обрабатываются в ПК в каждом приемном пункте по одинаковым алгоритмам для определения группового времени прихода атмосферика. Эти данные в течение 10 мин поступают в центр обработки – Вашингтонский университет [33].

Прототипом многопунктовой системы гронопеленгации является двухпунктовая система. Суть разработанных методов, используемых в многопунктовых системах, заключается в определении места возникновения грозового разряда по точке пересечения пеленгов, измеренных из различных пунктов. Двухпунктовые системы, основанные на данном методе, называются пеленгационными [4, 6].

Если проводить сравнение однопунктовых и многопунктовых систем, то по точности определения местоположения грозового разряда однопунктовые уступают многопунктовым. По экономическим затратам, несомненно, однопунктовая система является наиболее выгодной, так как постановка многопунктовой системы требует не только развитой инфраструктуры передачи данных и определенного числа персонала для обслуживания каждой из станций, но и точной синхронизации по времени. Увеличение требований к постановке таких систем связано с ограничениями на допустимые значения соотношений сигнал/шум, которые, как было отмечено выше, приводят к уменьшению

размеров базовых расстояний между пунктами регистрации и, соответственно, к увеличению числа приемных станций [35].

На территории Якутии грозовая активность изучалась с применением пассивных радиотехнических наземных методов наблюдения за грозами [1, 13, 36, 37, 38, 39].

Первые инструментальные измерения числа разрядов в Якутии были выполнены в 1970-х годах при поддержке Иркутского государственного университета в рамках исследования грозовой активности Восточной Сибири. При этих исследованиях использовали широкополосные и узкополосные грозовые счетчики.

В 1992 г. была проведена работа по отработке методики двухпунктовой грозолокации без применения специальных систем синхронизации наблюдений в пунктах [3]. Один пункт располагался в г. Якутске, а другой – в г. Олекминске. Расстояние между пунктами 543 км. В результате проработки возможных каналов передачи цифровых данных между пунктами грозолокации Олекминск-Якутск была использована в то время автоматизированная система «Циклон» Якутского территориального управления по гидрометеорологии. Приемно-усилительные тракты обеспечивали непрерывный прием, усиление и передачу по кабельным линиям трех компонент электромагнитного поля атмосфериков в полосе частот 200 Гц-10 кГц. Для этого были необходимы три АЦП для каждого пеленгатора. С помощью АЦП производилось преобразование сигналов в цифровую форму. Цифровые данные непрерывно передавались в буферное запоминающее устройство. В целях уменьшения «мертвого времени» регистрации в комплекс была дополнительно введена миниЭВМ для обработки информации и вывода результатов на магнитные носители. Результаты обработки могли выдаваться в виде оперативных карт грозовой активности по каждому часу. Однако условия использования телеграфного канала, предоставленного Управлением гидрометеорологии, не позволяли производить почасовую передачу данных. В этой связи, карты грозовой активности строились для интервалов времени, не меньших 8 часов [3].

С 1993 наблюдениями за грозами занимается Институт космофизических исследований и аэронавтики (ИКФИА) и продолжает по настоящее время с использованием однопунктового грозопеленгатора с радиусом действия до 1000 км и точностью определения грозового разряда 25 – 100 км.

Для выделения разрядов облако-земля в ИКФИА СО РАН оценивается спектр атмосферика и определяется «средняя» частота. В [40] отмечено, что на каждый главный обратный разряд на землю приходится до [8] 9 разрядов типа облако-облако с амплитудой в среднем в два раза меньшей, чем у главного разряда. При этом каждый главный разряд сопровождается в среднем тремя повторными разрядами, а другие разновидности разрядов имеют значительно меньшую амплитуду. В работах [4] и конкретно для Восточной Сибири в [41] по визуальным наблюдениям показано, что разряды типа облако-земля составляют приблизительно 33% от всех регистрируемых [8]. Доля разрядов облако-земля в Западной Сибири – около 40 % от числа всех регистрируемых за сезон [42].

Пороговая частота, равная в среднем 15 кГц, соответствует границе спектра разрядов облако-облако и облако-земля. Значение пороговой частоты не превосходит практически 33% атмосфериков, регистрируемых за сезон. Если частота атмосферика больше порогового значения, то такие разряды определялись как межоблачные.

Наблюдения для зоны радиусом в 400 км вокруг Якутска, проведенные в ИКФИА в 2009 г. показали, что наземные разряды составляют 65%.

Кроме того, в г. Якутске (с 2005 года), г. Мирном (с 2006 года) и г. Нерюнгри (с 2005 года) [16, 39] расположены однопунктовые грозопеленгаторы LD-250 (Voltek) с радиусами охвата до 400 км. Точность лоцирования разрядов таких грозопеленгаторов от 5 до 25 км, что позволяет более внимательно следить за регионами с наибольшей плотностью грозовых разрядов.

С 2009 года в Якутске открыт пункт научной сети для регистрации молниевых разрядов WWLLN, зона покрытия охватывает территорию Северо-Восточной Азии, ближайший такой пункт сети WWLLN в России находится на Камчатке [33].

1.2 Статистические методы моделирования грозовых очагов

При моделировании грозовых процессов, обладая только лишь информацией о времени прихода и координатах ХУ грозовых разрядов, исследователь сталкивается, в виду особенностей физического процесса, с тем что, не существует аналитических методов построения грозового очага. Для решений задач такого рода рекомендуется применять методы статистического моделирования.

В этой связи необходимо:

- дать определение грозового очага, проанализировать методы и алгоритмы выделения грозового очага, предложенные другими исследователями;
- сформулировать известные принципы построения математических моделей статистическими методами.

Статистическое моделирование позволяет объяснить некоторые процессы или структуру взаимосвязи между событиями [43]. Целью моделирования является выделение наиболее существенных закономерностей изучаемого явления в наглядном и доступном для изучения виде [44]. Статистические модели предназначены для измерения силы и направления связей между двумя или более переменными [44], а также в некоторых случаях позволяют судить о структуре связей между несколькими переменными.

Структурные модели статистического моделирования предназначены для исследования структуры некоторого множества переменных либо объектов [44, 45]. Существует несколько подходов к выделению однородных групп объектов. Структурный подход подразумевает выделение плотных групп объектов, отстоящих друг от друга на расстояния, задаваемые граничными условиями, и позволяет находить естественные структуры повышенной плотности объектов. При этом данные могут быть представлены как объекты в многомерном пространстве признаков или при помощи матриц межобъектных расстояний. Для исследования структуры совокупности объектов применяются методы кластерного анализа и визуализация данных [46]. Принадлежность исследуемых

объектов к одной структуре определяется критическим значением расстояния между ними: чем больше объекты "похожи" друг на друга, тем значение расстояния меньше.

Термин кластерный анализ впервые ввел К. Трион в 1939 году [47]. Под кластерным анализом понимается метод изучения однородности сложных, на поверхности неочевидно взаимосвязанных объектов [44, 48].

В общем, задача кластеризации ставится следующим образом. Пусть X – множество объектов, Y – множество номеров кластеров. Задана функция расстояния между объектами $d(X_i, X_j)$. Конечная обучающая выборка объектов $X_k = \{x_1, \dots, x_n\} \subset X$. Требуется разбить выборку на кластеры (непересекающиеся подмножества) так, чтобы каждый кластер состоял из объектов, близких по метрике d , а объекты разных кластеров существенно отличались. Каждому объекту $x_i \in X_k$ соотносится номер кластера y_i . В некоторых случаях множество Y известно заранее, поэтому чаще ставится задача определения оптимального числа кластеров, с учетом заданного критерия качества кластеризации [49, 50], а решением задачи кластеризации является разбиение, удовлетворяющее некоторому критерию оптимальности. Этот критерий можно представить, как функционал, выражающий уровни желательности различных разбиений и группировок, его называют целевой функцией [48]. В результате полученный образ представляет собой реально существующую общность объектов, обладающих необходимыми и достаточными признаками [44].

Являясь разделом многомерного статистического анализа данных, кластерный анализ позволяет рассматривать взаимосвязи большего числа признаков объекта. На практике кластерный анализ реализуется набором различных алгоритмов распределения объектов по группам. Цель применения этого метода – определение однородности изучаемых объектов; если она не может быть установлена другими, более простыми методами, – анализ и идентификация наблюдаемых и однородных объектов. «Однородность» означает схожесть объектов в многомерном пространстве признаков, и тогда задача сводится к выделению в этом пространстве естественных скоплений объектов. В

работах [51, 52] отмечается, что в сравнении с другими статистическими методами, кластерный анализ используется тогда, когда нет априорных гипотез относительно классов, и исследователь находится в стадии дескриптивной статистики. В связи с этим кластерный анализ определяет "наиболее возможно значимое решение", поэтому проверка статистической значимости здесь неприменима [53].

Качество кластеризации – степень приближения результатов кластеризации к идеальному решению [54]. Задача оценки качества усложняется тем, что для большинства задач идеальное решение неизвестно. Оценка качества кластеризации может быть проведена двумя способами [54]. Формальный способ основан на определении формальных критериев. Наилучшим считается решение, для которого значение формального критерия максимально. Критериями качества кластеризации принято считать показатели четкости разбиения, энтропийные критерии, показатель компактности и изолированности и индексы эффективности, но в целом, критерием качества кластеризации данных является адекватное разделение кластеров в векторном пространстве [55].

При экспертном способе решение оценивается специалистами заданной предметной области, поскольку не существует однозначно наилучшего критерия качества кластеризации. Известно множество критериев и ряд алгоритмов, не имеющих чёткого критерия, но осуществляющих достаточно разумную кластеризацию, учитывающих особенности исследуемого явления или процесса. Все они дают разные результаты. В тоже время при моделировании сложных физических процессов количество кластеров заранее неизвестно и определяется в соответствии с некоторым субъективным критерием, а результат кластеризации существенно зависит от метрики, выбор которой, также субъективен и определяется экспертом. Тем не менее, в ряде случаев, возможно, оценить качество кластеризации [50].

1.2.1 Мера сходства

При кластеризации грозových ячеек и очагов возникает проблема измерения близости объектов. Мера сходства – есть расстояние между объектами.

Пусть X_i и X_j – признаки объекта, тогда неотрицательная вещественнозначная функция $d(X_i, X_j)$ называется функцией расстояния (мерой или метрикой), если:

- а). $d(X_i, X_j) > 0$, для всех X_i и X_j из E_2 ;
- б). $d(X_i, X_j) = 0$, тогда и только тогда, когда $X_i = X_j$;
- в) $d(X_i, X_j) = d(X_j, X_i)$;
- г) $d(X_i, X_j) < d(X_i, X_k) + d(X_k, X_j)$, где X_i, X_j, X_k любые три вектора из E_2 .

Значение метрики $d(X_i, X_j)$ для заданных признаков X_i и X_j называется расстоянием между X_i и X_j , в том случае, когда данные представлены в количественных шкалах, наиболее часто используемой, универсальной мерой расстояния является евклидово расстояние (метрика Евклида) [48]:

$$d(X_i, X_j) = \left(\sum_{k=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

где x_i, x_j – элементы множества признаков объекта.

Евклидово расстояние – обычный способ вычисления рассматриваемых метрик, который хорошо «работает», если данные представляют собой двух- или трёхмерное пространство. В этом случае эта мера находит реальное геометрическое расстояние между объектами на плоскости или в пространстве. Вычисляется по исходным данным без нормирования.

Границы применимости в качестве меры метрики Евклида определяются несоответствием размерностей координатных осей, по координатам которых вычисляются эти расстояния. На практике часто случается, что признаки могут

быть представлены в разных единицах измерения. Результат некорректного применения метрики Евклида, как правило, – искаженные результаты кластеризации и их значительное отличие от предыдущих, поэтому для адекватной оценки расстояний между объектами необходима предварительная нормировка показателей. Нормировка показателей позволяет ввести новую условную единицу измерения, допускающую формальные сопоставления объектов.

В таких случаях, в качестве метрики применяют взвешенное Евклидово расстояние:

$$d(X_i, X_j) = \left(\sum_{k=1}^n w_k (x_{ki} - x_{kj})^2 \right)^{1/2},$$

где w_k – вес степени важности каждого признака.

Расстояние Махаланобиса (метрика Махаланобиса) – это обобщение идеи многомерного измерения количества стандартных отклонений от объекта до среднего значения. Оно равно нулю, если образец полностью совпадает со средним значением и увеличивается по мере удаления образца от среднего значения вдоль каждой оси признака.

Если признаки представлены в разных единицах измерения, то можно применять расстояние Махаланобиса [56]. Расстояние Махаланобиса часто называют обобщенным евклидовым расстоянием.

Метрика Махаланобиса учитывает инвариантность относительно невырожденных линейных преобразований и коррелированность признаков между собой. Эти преимущества избавляют исследователя от потребности в нормировке исходных данных [57].

Мера Махаланобиса имеет вид:

$$D^2(X_i, X_j) = (X_i - X_j)^T C^{-1} (X_i - X_j),$$

где $(X_i - X_j)$ и $(X_i - X_j)^T$ – прямой и транспонированный векторы расстояний между двумя классами, C^{-1} – обратная матрица к матрице межгруппового рассеяния [58].

В многомерном случае элементы матрицы C^{-1} , которая является несмещенной оценкой ковариационной матрицы C , вычисляются по следующей формуле:

$$c_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j),$$

где i, j – количество элементов класса, $(x_{ki} - \bar{x}_i)$ и $(x_{kj} - \bar{x}_j)$ – отклонения значений переменных класса от общего среднего.

Расстояние Махаланобиса характеризует в геометрическом смысле расстояние между образцом и эталоном, с учетом их парных корреляционных связей между одноименными столбцами матриц, причем расстояние отсчитывается от образца до эталона [59]. Расстояние Махаланобиса – проверенный надежный критерий, который теоретически обоснован и дает независимую оценку различию образца и эталона, а также может использоваться как индикатор обнаружения выбросов в многомерных выборочных совокупностях [60].

Вычисление ковариационных матриц C для векторов, состоящих из десятков и сотен переменных – это реализуемая устойчивая техническая задача, имеющая квадратичную сложность. Однако, располагая вычисленными ковариационными матрицами C , поиск обратных матриц является неустойчивой задачей кубической сложности, поэтому реальным является обращение матриц не более 100-го порядка [57].

1.2.2 Алгоритмы кластеризации

Иерархическими алгоритмами называются такие алгоритмы, которые на выходе создают иерархию кластеров, с возможностью выбора любого уровня этой иерархии для интерпретации результатов алгоритма. Среди иерархических алгоритмов выделяют агломеративные. Агломеративные алгоритмы – это алгоритмы, которые начинают свое выполнение с того, что каждый объект заносит в свой собственный кластер и по мере выполнения объединяют кластеры, до тех пор, пока в конце не получается один кластер, включающий в себя все объекты набора. Самыми распространенными примерами иерархических агломеративных алгоритмов являются «алгоритмы ближнего, дальнего и среднего соседей». Эти алгоритмы объединяют в группы по значению расстояния между близлежащими, наиболее удаленными или центральными объектами кластеров [61, 62, 63].

Определение кластеров такими алгоритмами может быть показано на примере алгоритма ближайшего соседа, который впервые был описан Фиксом и Ходжесом в 1951 году [64]. Это метод, использующий евклидово пространство описания событий, и при его простоте и точности его основным недостатком является требование большой памяти [65] и медленная и (или) нестабильная сходимость алгоритма [66].

Приведем пример алгоритма ближайшего соседа.

Шаг 1. Пусть обучающая выборка $X_k = \{X_1, \dots, X_n\}$ образует множество кластеров $\{X_1\}, \dots, \{X_n\}$. Составляем матрицы попарных расстояний между объектами $d(X_i, X_j)$:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаг 2. Поиск наименьшего элемента матрицы попарных расстояний:

$$d_1(X_i, X_j) = \min d(X_i, X_j).$$

Шаг 3. Классифицируемый объект X_i относится к тому же классу Y_j , которому принадлежит ближайший объект обучающей выборки X_k .

Шаг 4. Проверка количества кластеров. Если множество Y_j содержит больше одного элемента, то необходимо перейти к шагу 1, а если количество кластеров равно 1, то выход из подпрограммы.

Этот алгоритм строит, как правило «волоконистые», «рыхлые» кластеры, «сцепленные вместе» единичными элементами, случайно оказавшимися ближе остальных друг к другу [48].

Правило «дальнего соседа», объединяющее наиболее отдаленные элементы обучающей выборки, непригодно, в том случае, если цепочная форма – это свойственная форма получаемых разбиений и кластеры имеют удлиненную форму.

Также популярным методом является метод k -средних. Он был предложен в 1950-х годах в работах [67, 68]. Алгоритм, основанный на этом методе, формирует кластеры, в которых суммарное квадратичное отклонение элементов кластеров от их центроидов минимально.

Алгоритм работы k -средних имеет следующий вид:

Шаг 1. Пусть дана обучающая выборка $X_m = \{X_1, \dots, X_n\}$ и предполагаемое число кластеров – k .

Шаг 2. Для каждого из k кластеров случайным образом создаем их центроиды μ .

Шаг 3. Для каждого центроида μ рассчитываем расстояния от центров кластеров до всех объектов.

Шаг 4. Формируем кластеры по правилу: каждому центроиду μ_k из множества $X_m = \{X_1, \dots, X_n\}$ соответствует подмножество точек X_k с минимальным расстоянием до μ_k .

Шаг 5. Перемещаем центр кластера в центроид μ_k его точек данных и вычисляем новые центроиды как среднее всех точек кластера.

Шаг 6. Если центроиды μ_k кластера остаются неподвижными, заняв устойчивое положение, то выход из подпрограммы, если они сдвинулись, то переход к шагу 3.

В данное время существует множество других методов объединения кластеров, особенности работы каждого и границы их применения рассмотрены в работах [48, 69, 70]. Большинство базовых методов модернизируются и (или) адаптируются для решения различных специфических задач.

Различные меры расстояния и методы кластеризации могут выдавать различные разбиения на кластеры для одной и той же выборки. Принятие решения о разумном числе кластеров и однозначность решения поставленной задачи зависят от исследователя.

В целом, общий алгоритм кластеризации можно выполнить следующим образом:

Шаг 1. Подготовка данных.

Шаг 2. Выбор метрики.

Шаг 3. Выбор алгоритма кластеризации.

Шаг 4. Выполнение алгоритма.

Шаг 5. Представление и интерпретация полученных результатов.

1.3 Грозные процессы

Наиболее естественный путь нахождения кластеров заключается в том, что дается его точное определение и отыскивается скопление точек, обладающее заданными свойствами. Для решения задачи структурной классификации необходимо четко сформулировать понятие кластера заданного явления или процесса, а также сформировать критерий, экстремальное значение которого, будет соответствовать наилучшему разбиению.

Гроза – это атмосферное явление, при котором внутри облаков или между облаком и земной поверхностью возникают потенциально опасные электрические разряды. В связи с этим необходимо знать области с повторяемостью гроз [71], повышенной по сравнению с соседними районами, поэтому одной из основных задач является построение карт плотности распределения грозовых разрядов (картирование) исследуемого региона [72]. Первое картирование грозовой активности в СССР было выполнено в 1957 г. [73], при этом были использованы данные более 2000 метеорологических станций наблюдения за грозами. Картирование гроз – это одна из первых попыток классификации грозовой деятельности по плотности грозовых разрядов на единицу площади в единицу времени. В качестве инструментальных методов местоопределения грозовых разрядов на территории Северной Азии используются или однопунктовые грозопеленгаторы, или многопунктовые системы местоопределения грозового разряда с большим раздвижением между пунктами. В обоих случаях достаточно велика погрешность местоопределения разряда. В этом случае представляется необходимым использовать для построения карт плотности данных, полученных после кластеризации. Усреднение данных о местоположении грозовых разрядов позволяет увеличить точность лоцирования плотных объектов при картировании гроз.

В работах [2, 74, 75] определяют понятие грозовой конвективной ячейки как основного неделимого элемента облака, являющегося структурным элементом грозового облака. Под грозовым очагом [2, 76] подразумевается совокупность конвективных ячеек, содержащая более одной конвективной ячейки и характеризующая отдельную грозу как комплексное явление единое в пространстве и времени.

В соответствии с данными понятиями отдельная грозовая ячейка – это одна ячейковая гроза, а по альтернативной классификации по условиям развития – внутримассовая гроза. Грозовая ячейка, с нетипичными параметрами, превосходящими по своим размерам другие отдельные грозовые ячейки, является суперячейкой, типом грозы, возникающим на холодных фронтах и фронтах -

окклюзий. Грозовой очаг определяется как многоячейковая фронтальная гроза, в которой ячейки имеют похожие параметры. Данное соответствие носит априорный характер и, несомненно, является неустойчивым и требующим экспериментальных подтверждений. Встречаются и многоочаговые грозы, так называемые мезомасштабные комплексы [72, 74].

Таким образом, целью внедрения алгоритмов кластерного анализа является выделение грозowych ячеек и очагов из массива грозowych разрядов для последующего определения их основных параметров.

В связи с этим, начиная с 1980-х годов, исследованием применимости известных методов кластеризации и адаптацией этих методов к задачам исследования грозовой активности занимаются коллективы исследователей под руководством М.С. Александрова, З.М. Бакленевой, И.И. Кононова и И.Ю. Юсупова, В.И. Козлова, В.П. Горбатенко, А.Х. Аджиева.

Большинство попыток кластеризации начинаются с применения методов кластерного анализа вручную на сравнительно небольших интервалах времени. Так, одна из первых, пробных процедур кластеризации была проведена в работе [77]. В случае «ручной» обработки, при небольшом количестве фиксируемых разрядов, данная процедура может дать неплохие результаты. При увеличении числа регистрируемых разрядов, «ручной» метод требует громоздких и длительных вычислений. Действительно, в наше время изучение кластерного анализа всегда сопряжено с попытками формализации алгоритмов и созданием программно-вычислительных пакетов. Как известно, количественного критерия правильности и объективности разбиения на классы, не существует. Косвенным доказательством объективности классификаций является совпадение состава классов, как при использовании различных методов, так и различных мер схожести объектов. В связи с этим, полной формализации алгоритмов кластерного анализа для исследования грозовой активности достичь достаточно сложно, всегда будет присутствовать такой момент, когда конечное решение принимается исследователем и только.

Важнейшим пунктом при выборе и адаптации алгоритма кластеризации для решения данной задачи является формирование условий, при соблюдении которых разбиение будет считаться наиболее адекватным. Так как, результатом кластерного анализа представляется комплекс грозовых разрядов четко отделенный в пространстве и во времени от рядом стоящих и характеризуемый как грозовая ячейка или грозовой очаг, необходимо задаться «уверенными» методиками кластеризации и критическими значениями параметров грозовых объектов.

Конвективная ячейка [78] определяется основными параметрами: время жизни, количество разрядов в ней, ее площадь, интенсивность, поперечные и продольные размеры, формы ячейки и др.

Жизненный цикл ячейки делится на три этапа: стадия развития, стадия зрелости и стадия рассеивания [2]. На стадии развития вертикальные воздушные токи направлены повсюду вверх, в результате чего образуется вертикальное облако. Процесс зарождения осадков без их выпадения происходит на стадии развития. Осадки выпадают, как только размеры капель или льдинок достигают критических показателей. В этот момент ячейка переходит в стадию зрелости.

Затем, поднимающиеся вверх потоки воздуха рассеиваются, это означает её переход в стадию рассеивания. За время жизненного цикла исчезают все эффекты, как электрические, так и другие [79]. Таким образом, конвективная ячейка, являясь составным элементом облака, может являться признаком для классификации гроз по их составу.

Кучево-дождевые облака разделяются на три типа, согласно классификации, принятой Всемирной метеорологической организацией [80]. В соответствии с предложенной классификацией представляется возможным сопоставить каждому из типов кучево-дождевых облаков типы метеорологических процессов, происходящих на территории исследования. Так, одноячейковые кучевые облака обычно состоят из конвективной ячейки с восходящим потоком в центральной части.

Одноячейковой грозой называется гроза, состоящая из одной ячейки, обладающей характерными свойствами: линейными размерами до 20 км, время жизни такой грозы составляет ~25 минут, в редких случаях до 1 часа [79]. Грозовая активность, а в некоторых случаях и градовая активность, такой грозы при выпадении осадков быстро разрушается.

Многоячейковые кучево-дождевые облака – наиболее распространённый тип масштабом от 10 до 1000 км. Они состоят из группы грозовых ячеек (грозового очага),двигающихся как единое целое, хотя каждая ячейка может находиться на разных стадиях развития грозового облака [81], поэтому грозы, связанные с возникновением таких облаков, наиболее мощные и достаточно продолжительные. Грозовые ячейки, находящиеся в максимальной стадии развития, как правило, располагаются в центральной части облака, а распадающиеся ячейки – с подветренной стороны. Они имеют поперечные размеры 20—40 км. Каждая отдельная ячейка в многоячейковом кучево-дождевом облаке находится в грозовом состоянии около 20-30 минут [72, 79].

Облака типа суперячейки обычно развиваются на холодных фронтах и провоцируют развитие суперячейковой грозы. Суперячейки – наиболее интенсивные грозовые и градовые облака, размеры которых огромны и достигают порядка 50 км в диаметре. Продолжительность такой грозы может составлять 4 часа.

1.4 Статистические методы определения параметров грозовой активности

Рассмотрим используемые методы кластеризации грозовых разрядов и реализующие их алгоритмы. В работе [2] предложена итерационная процедура, состоящая из двух этапов.

Данные о каждом ударе молнии представляются в виде вектора признаков: $Q_i = \{X_i, Y_i, t_i\}$, где $i = 1, \dots, N$.

Шаг 1. Находятся наиболее удаленные один от другого векторы, которые объявляются базисными векторами первых двух локальных кластеров.

Шаг 2. Векторы признаков, за исключением тех, которые стали базисными, распределяются по локальным кластерам по правилу ближайшего соседа.

Шаг 3. После окончательного разбиения всей анализируемой выборки, состоящей из N векторов признаков, определяется коэффициент некомпактности: $C = \frac{N_i}{N}$ и если он меньше заданного порогового значения, то процесс кластеризации оканчивается.

Характерными особенностями предложенного алгоритма являются вектор-признак, рассмотренный в составе трех компонент (координаты X и Y грозового разряда и время его регистрации), построение пространства кластеризации и пространства признаков. Переход из одного пространства в другое осуществляется с помощью оператора линейного преобразования. При этом компоненты оператора устанавливаются с учетом, как характерных линейных размеров грозы, так и погрешностей систем местоопределения ударов молний. За форму грозового кластера принимают окружность, как и в работах [82, 83, 84]. Расчет характеристик грозы производится сначала в пространстве кластеризации, а затем полученные результаты отображаются в пространстве признаков. В работе [2] приведены конкретные оценки параметров грозовых объектов и проведен их сравнительный анализ с оценками, описанными ранее в литературных источниках.

И. И. Кононов в работе [74] при исследовании грозовых процессов также применяет кластерный анализ, состоящий в применении двух алгоритмов классификации последовательно. Для кластеризации на первом этапе применяется адаптированная модификация известного алгоритма FOREL (FORmal Element) [85]. Алгоритм FOREL основан на объединении в один кластер объектов в областях их наибольшего сгущения. Целью работы данного алгоритма является поиск такого разбиения множества объектов, чтобы функционал качества F был минимален:

$$F = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in K_j} d(x, C_j),$$

где K_j – текущий кластер, C_j – центр текущего кластера, $d(x, C_j)$ – расстояние между объектами.

В отличие от кластеризации М. С. Александрова, время появления молниевых вспышек в работе анализируется отдельно от их пространственных координат. Форму грозового очага автор определяет также как окружность радиуса, значение которого может изменяться в процессе работы алгоритма, причем начальное значение, учитывая физические свойства грозового облака, принимается равным 10 км. Кластерный анализ применяется на некоторых заданных промежутках времени, то есть производятся сечения по времени. Цель следующего этапа кластеризации – добавить и (или) исключить части грозовых разрядов, так как за определённый временной интервал могут наблюдаться как отдельные, хорошо отделимые, грозовые кластеры, так и конечная или начальная стадия развития отдельного грозового процесса. Данная процедура аналогична процедуре ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques) [86].

В этом алгоритме кластеризации определены также две дополнительные процедуры — объединение кластеров и их разъединение. Первая процедура отвечает за соединение двух кластеров, если расстояние между их центрами меньше, чем некоторый заданный параметр. Процедура разъединения, наоборот, осуществляет разбиение кластера на два, если текущее значение радиуса кластера превышает значение параметра. Результат работы алгоритма предоставляет возможность оценить параметры грозовых кластеров. На основе предложенного метода, по характеру формируемых кластеров, авторы предлагают выделить несколько типов гроз.

Для объединения разрядов в грозовые объекты в работе А. А. Васильева применяется правило ближайшего соседа, основанное на евклидовой метрике [8]. Как и в работах Кононова и Юсупова [74], кластеризация проводится в условиях

того, что вектор признака состоит из двух координат, соответствующих координатам грозового разряда на плоскости. Рассматриваются сечения грозовых кластеров в течение одного часа. Основные параметры кластеризации выбираются в соответствии с основными параметрами грозовых очагов. Так, ссылаясь на литературные источники, авторы принимают условие, что значение параметра для выделения грозового кластера равно 75 км.

Из последних работ необходимо обратить внимание на работы [87] и [88, 89]. В работе [87] Аджиевой А.А., как и в работах зарубежных исследователей [90, 91, 92] применяется метод k -средних, который требует числа кластеров, что априорно неизвестно. Для определения числа кластеров авторами используется «разведочный» алгоритм: сначала совокупность делится на два кластера, затем на три и так до тех пор, пока не будет найдено оптимальное число кластеров. Этот алгоритм позволяет определить число кластеров и сопоставить этим кластерам конкретные грозовые объекты.

В работах [88, 89] после детального разбора, применяемых для кластеризации грозовых разрядов методов, принимается решение о применении непараметрического алгоритма DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [93]. Этот алгоритм также был применен для кластеризации грозовых разрядов в работе [94].

Результаты, полученные в проанализированных работах, не противоречат данным, использующимся в современной теории и практике, но, тем не менее, требуют определенной точности определения формы кластера. Это связано с тем, что, с одной стороны, в результате применения некоторых алгоритмов создаются "волокнистые" кластеры, иными словами, кластеры эллиптической формы. С другой стороны, на фронтах действительно возникают грозовые облака, оконтуренные эллипсом [95], именуемые фронтальными грозами. В данном случае форма очага определяется воздушным потоком, напиранием на грозовое облако с подветренной стороны, придавая ему овальную форму.

Таким образом, существует два подхода при определении размерности вектора-признака грозового разряда. С одной стороны, вектор-признак может

состоять из трех координат: двух координат на поверхности Земли и времени. Этот подход принимается за основу в работах Александрова [2]. С другой стороны, вектор-признак может быть представлен двумя координатами грозового разряда и грозовые кластеры при этом проецируются на временную ось. Этот подход требует большей затраты времени и реализуется в алгоритмах, предложенных Кононовым и Васильевым [8, 74]. Преимущество первого подхода состоит в том, что распознавание становится более «машинным», что, несомненно, гораздо удобнее. Второй подход подразумевает непосредственное участие человека и требует больших усилий с его стороны. Тем не менее, кластеризацию грозовых разрядов все ещё нельзя полностью доверить машине, потому что процесс образования грозы – многофакторный, и многие из параметров оказывающие на него влияние, могут быть подвергнутыми тщательному анализу только с позиции исследователя. В данном случае предполагается диалоговый режим программного комплекса, реализующий такие алгоритмы.

Экспертная оценка – это оценка качества кластеризации, которая используется во всех известных применяемых алгоритмах. Это, как было сказано выше, тот метод оценки качества, при котором корректное решение поставленной задачи заведомо неизвестно. Тем не менее, экспертная оценка – работающий метод для получения корректных разбиений, так как в настоящее время широко развиты не только пассивные радиотехнические методы определения грозовых разрядов, но и активные – реализуемые при помощи радиолокационных методов, показатели которых предоставляют более достоверные сведения о физических параметрах грозовых объектов тех или иных территорий. Это позволяет исследователям соотносить результаты, полученные при кластеризации, с результатами, полученными при работе активных систем местоопределения грозового разряда.

1.5 Параметры грозовых ячеек и очагов

В своих работах Кононов и Юсупов [74] для выделения грозовых областей, применяя методы кластеризации и реализующую их процедуру с заданными параметрами по характеру образуемых кластеров, выделяют несколько типов гроз. Классификация Кононова была показана в работе [96] на примере разрядов, зарегистрированных на территории Франции. Например, к грозам первого типа авторы относят многоячейковые грозы с несколькими долгоживущими кластерами-ячейками, возникающими на расстоянии 30-40 км друг от друга. Их центры перемещаются с высокой скоростью (50 км и более) по непересекающимся траекториям, близким к прямым линиям. Эти грозы обычно появляются вдоль холодных фронтальных разделов глубоких циклонов. Треки центров кластеров грозовых комплексов образуют пространственную картину грозовой активности в виде достаточно широкой (50-150 км) вытянутой (250-300 км) полосы. Эта картина может формироваться либо несколькими группами кластеров, почти одновременно возникающими в различных местах этой полосы (на расстояниях 50-100 км между группами) и перемещающимися в одном направлении, либо группами кластеров, рождающимися последовательно во времени. В грозах первого типа большинство кластеров формируется несколькими последовательно развивающимися конвективными ячейками. Обычно новая ячейка появляется на правом фланге предшествующей. Некоторое время они могут функционировать одновременно, при этом радиус кластера, оцениваемый, исходя из текущего значения величины среднеквадратичного отклонения координат, входящих в кластер молниевых вспышек относительно координат его центра тяжести, возрастает до 20-25 км.

Ко второму типу авторы [74] относят также многоячейковые грозы, с достаточно длинными (до 100км), но менее упорядоченными кластерами, треки центров, которых могут быть значительно искривлены. Такой тип гроз характерен для вторичных фронтов и фронтов окклюзии.

Третий тип – внутримассовые одноячейковые грозы с недолго живущими (от единиц до 20-30 минут), короткими (протяженностью до 20-30 километров) кластерами-ячейками, место появления и направление последующего перемещения которых, также как и грозовой активности, в целом, в отличие от гроз первых двух типов, обычно непредсказуемо и трудно прогнозируемо [74].

Типы гроз, предложенные и описанные Кононовым и Юсуповым [96], их основные черты, значения основных параметров гроз подобны параметрам грозовых объектов, описанным в работе [6] и полученным при использовании радиолокаторами гроз.

Выводы к главе

Таким образом, классификация на основе кластерного анализа не позволяет выделять существенно новые, отличные от известных, типы гроз, но результатом применения кластерного анализа являются типы гроз, характерные для исследуемого региона, что, несомненно, вносит большой теоретический и практический вклад в исследование грозовой активности.

В результате выполненного обзора научных публикаций, посвященных задаче выделения грозового очага, выявлено, что не существует аналитического выражения, описывающего развитие грозового очага.

Для того чтобы исследовать грозовые процессы необходимо выделять грозовой очаг методами многомерного статистического анализа данных. Для исследования структуры совокупности объектов применяются методы кластерного анализа и визуализация данных, где грозовой очаг задается множеством векторов-признаков.

Для качественного выделения грозового очага из массива данных о грозовых разрядах необходимо улучшить точность определения местоположения грозового разряда при однопунктовых и многопунктовых методах, так как данные грозорегистраторов содержат неверные данные: «шумы» и погрешности определения координат грозового разряда в пункте наблюдения.

Таким образом, совокупность векторов-признаков грозových разрядов, выделенная в грозовой очаг, позволит исследователям систематизировать законы распределения грозových кластеров в пространстве и во времени и соотнести их с географическими законами, а также выявить среди грозových объектов наиболее опасные, угрожающие жизни человека и наносящие ущерб многим сферам его деятельности.

2 АППАРАТНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Однопунктовый грозопеленгатор-дальномер (рисунок 2.1), разработанный в ИКФИА, осуществляет пеленгацию с помощью усилителей сигналов, регистрирующей части и антенной системы, состоящей из двух скрещенных магнитных антенн и одной электрической вертикальной антенны [1].



Рисунок 2.1 – Однопунктовый грозопеленгатор-дальномер ИКФИА

Конструктивно трехметровая электрическая антенна с конусной насадкой (для увеличения емкости антенны) установлена на семиметровой металлической мачте на изоляторе. Две двадцати витковые экранированные рамки, имеющие форму квадрата (эффективная площадь рамки 360 м^2), размещены на той же мачте. Подбор необходимого коэффициента усиления действующей высоты штыревой антенны осуществляется шунтированием ее выхода конденсатором [1].

С этой же целью выходы рамочных антенн нагружались низкоомными резисторами. Сигнал с предварительных усилителей в центральный пункт сбора информации подается по симметричным кабельным линиям связи через разделительные трансформаторы для устранения наводок на линии связи.

В канале электрической антенны применен антенный усилитель для согласования большого внутреннего сопротивления электрической антенны с последующими предварительными усилительными каскадами. Предварительные малошумящие усилители (ПУ) идентичные для всех антенн, подключены к их выходам через трансформаторные входы и усиливают сигналы в полосе частот 0,3-60 кГц, обеспечивая необходимую величину сигналов при передаче данных (ПД) по кабельным линиям связи. Оконечные усилители (ОУ) обеспечивают согласование с линиями связи и наиболее эффективное использование динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Усиленный приемными трактами сигнал оцифровывается с помощью внешнего АЦП и обрабатывается в компьютере. Использование внешнего АЦП позволяет использовать переносные компьютеры с питанием от аккумуляторных батарей. Частота дискретизации АЦП – 250 кГц. Усиление всего тракта подобрано таким образом, что порог отбора атмосфериков для регистрации, составляющий на входе АЦП 50 мВ, соответствует сигналу на входе электрической антенны 150 мВ/м. В конечный файл записываются следующие параметры: время регистрации; среднеквадратичная амплитуда электрической составляющей сигнала (в разрядах АЦП); среднеквадратичная амплитуда магнитной составляющей сигнала (в разрядах АЦП); азимутальный угол прихода сигнала; коэффициент корреляции

между первым и третьим каналами; максимальная амплитуда сигнала (в разрядах АЦП); минимальная амплитуда сигнала (в разрядах АЦП); интервал времени от начала до максимума амплитуды сигнала (мсек); интервал времени от начала до минимума амплитуды сигнала (мсек); общая продолжительность сигнала (мсек); количество положительных квазиполупериодов относительно уровня 0,1 от модуля максимальной амплитуды сигнала; количество отрицательных квазиполупериодов относительно уровня 0,1 от модуля максимальной амплитуды сигнала; общее количество квазиполупериодов; индикатор ограничения по амплитуде сигнала; индикатор ограничения по продолжительности сигнала [97].

При использовании метода однопунктовой грозолокации определяются направление угла прихода электромагнитного сигнала в пункт наблюдения и дальность до грозового разряда.

Направление на грозовые разряды φ определяется по отношению среднеквадратичных значений сигналов атмосфериков $U_{с-ю, i}$ и $U_{в-з, i}$, поступающих с ортогональных магнитных антенн. Для устранения погрешности, вносимой шумовой составляющей поля, в измеряемые значения, из квадратичных значений сигналов атмосфериков вычитается фоновый уровень U_{φ} . Фоновый уровень определяется на предшествующем атмосферическому интервалу длительностью 1 мсек. $U_{\varphi}^2 = \sum (U_{\varphi, i} - U_{ср})^2$. При этом предполагается, что средние значения величины флуктуационной составляющей шумов естественного происхождения и величины сигналов низкочастотных радиостанций на соседних интервалах, длительностью в единицы миллисекунд, остаются неизменными [98]. Азимут прихода сигнала в этом случае:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{(\sum (U_{с-ю, i} - U_{ср, с-ю})^2 - U_{\varphi, с-ю}^2)^{0,5}}{(\sum (U_{в-з, i} - U_{ср, в-з})^2 - U_{\varphi, в-з}^2)^{0,5}} \right),$$

где $U_{ср, с-ю} = \sum U_{с-ю, i} / n$ и $U_{ср, в-з} = \sum U_{в-з, i} / n$ – соответственно, средние значения сигналов в течение одной миллисекунды с начала атмосферика, принятые с ортогональных магнитных рамочных антенн направленных С-Ю и В-З; n – число

отсчетов АЦП по каждому каналу в течение одной миллисекунды.

При приеме узкополосных сигналов, анализируя соотношения фаз горизонтальной и вертикальной компонент сигнала, однозначно определяется направление прихода сигнала [4].

Описанный метод определения пеленга не допустим при регистрации широкополосного сигнала. В данном случае направление прихода определяется при помощи сравнения знаков взаимной корреляции (ρ) электрической и магнитной компонент сигнала электромагнитного излучения. Знак коэффициента корреляции сигнала полезного сигнала и аппаратного шума зависит только от знака корреляции сигнала.

Присоединение рамочных антенн должно быть произведено таким образом, чтобы знаки коэффициентов в квадрате север-восток, что соответствует первому квадранту, были положительны». Тогда азимутальные углы (φ) прихода сигнала (направление обхода по часовой стрелке от северного направления) вычисляются с помощью таблицы 2.1. Здесь $\rho(X, Y)$ – коэффициенты взаимной корреляции между соответствующими компонентами сигнала с рамочных антенн [8].

Коэффициент $\rho(X, Y) > 0$, если ЭДС имеют одинаковые знаки, и $\rho(X, Y) < 0$, если знаки ЭДС противоположные.

Таблица 2.1 – Определение азимутальных углов (φ) прихода атмосфериков в зависимости от знаков коэффициентов взаимной корреляции (ρ) сигналов, принимаемых на антенны

$\rho(H_{\text{сво}}, H_{\text{вз}})$	$\rho(H_{\text{вз}}, E_z)$	$\rho(H_{\text{сво}}, E_z)$	φ
>0	>0	>0	φ^*
<0	>0	<0	$180 - \varphi^*$
>0	<0	<0	$180 + \varphi^*$
<0	<0	>0	$360 - \varphi^*$

Для оценки погрешности пеленгации проведены синхронные измерения пеленгов атмосфериков и сигналов СДВ радионавигационных станций двумя комплексами пеленгаторов, расположенных на расстоянии несколько сотен метров. Для источников атмосфериков и радиостанций, удаленных на сотни километров, можно считать, что пеленгаторы расположены в одной точке. Были определены одновременные пеленги для около 10 радиостанций и 200 атмосфериков, пришедших с различных направлений. Стандартное отклонение погрешности пеленгования составило $2,5^\circ$ для всех направлений, что аналогично измеренным на станции Пальмера [19]. Оценка систематических ошибок, обусловленных неточностью установки антенн и не идентичностью приемных трактов, показывает, что их вклад составляет не более 1° .

Исследование и оценка погрешности регистрации электромагнитного излучения, принимаемого однопунктовым грозопеленгатором-дальномером LD-250, установленного в пунктах гг. Мирный, Нерюнгри, Якутск, были проведены по результатам измерения 108 повторных атмосфериков 06.08.2006 г. Относительная погрешность измерения дальности от пункта до места возникновения грозового разряда (для расстояний между грозовым разрядом и пунктом регистрации 50 – 450 км) имеет постоянную величину 12% , с размахом 12% , при минимальном значении 6% и максимальном значении 18% и показана на рисунке 2.2.

В диапазонах действия частот ОНЧ – НЧ излучений для разрядов типа облако – облако отношение спектральных амплитуд сигнала значительно больше подобного отношения для главных отраженных разрядов на землю. При этом доля разрядов типа облако – земля составляет примерно 33% от всех зарегистрированных. Исходя из этого, для сигналов, зарегистрированных с электрической антенны, для шага по времени 8 мкс определяется коэффициент автокорреляции [99].

В исследованиях [98, 99, 100] летнего сезона был проведен анализ коэффициента, в результате которого определена его предельная величина, соответствующая примерно 33% регистрируемым сигналам атмосфериков. Если

коэффициент автокорреляции принимает значение больше предельного, то соответствующий ему сигнал определяет наземный грозовой разряд.

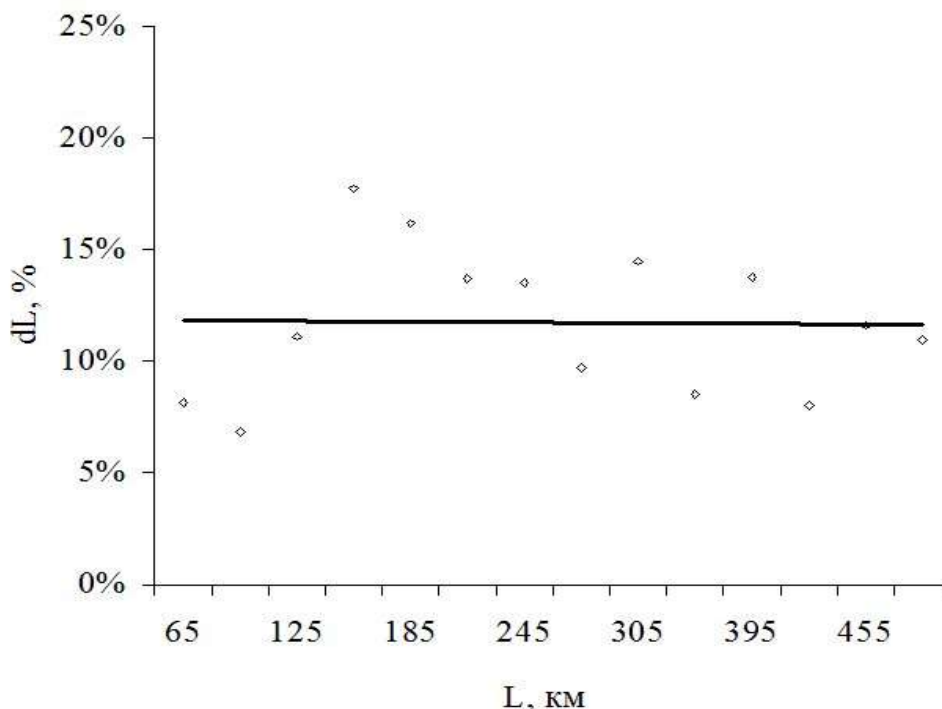


Рисунок 2.2 – Относительная погрешность измерения дальности грозопеленгатором-дальномером LD-250

Время задержки сигнала начала первого квазиполупериода относительно синхронизованного тактового импульса сигнала (рисунок 2.3) в моменты времени t_i и t_{i+1} для первого пункта и в момент времени t_i^* и t_{i+1}^* для второго пункта определяется с помощью последовательно измеренных пар величин напряжений квазигармонических сигналов разной полярности. Аналогово-цифровой преобразователь, принимающий входные аналоговые сигналы с антенной системы, генерирует соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки.

Приращение времени (с учетом задержек при измерениях в разных каналах $t_i^* - t_i = t_{i+1}^* - t_{i+1} = \tau_{i+1} \dots = \Delta T$) определяют по измеренным парам величин напряжений разной полярности U_1, U_2 и U_1^*, U_2^* – до и после перехода через ноль.

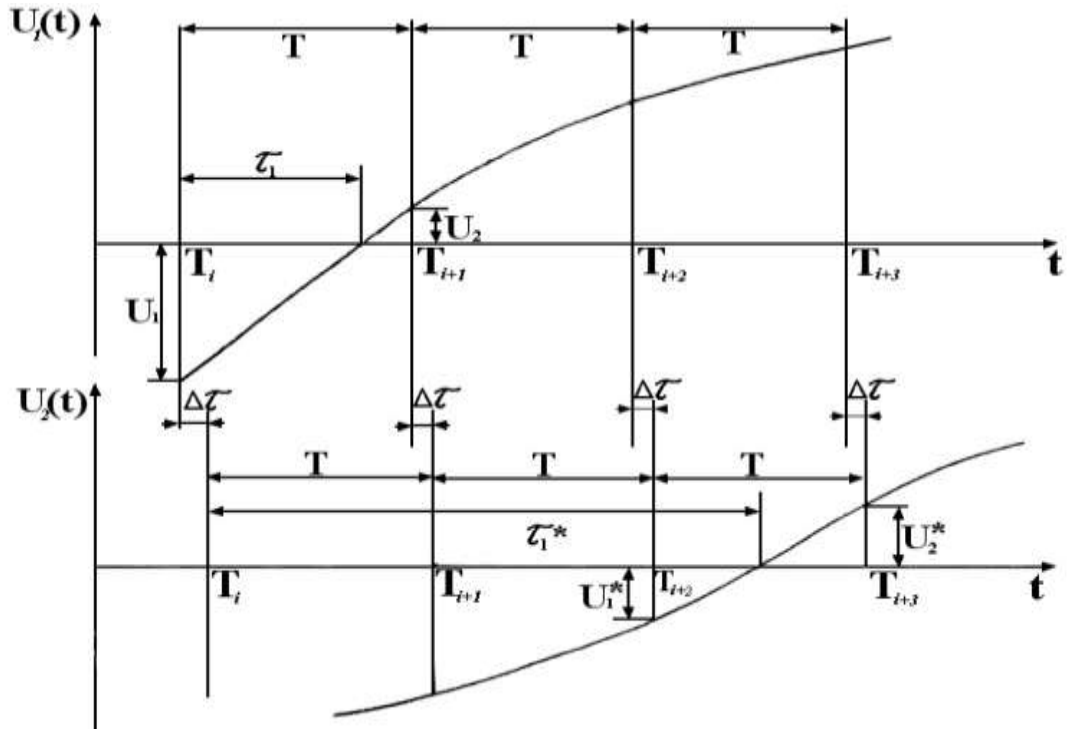


Рисунок 2.3 – Измерение времени запаздывания сигнала

$$\tau_i = \frac{U_1 \cdot T}{(U_1 + U_2)}; \tau_i^* = \frac{U_1^* \cdot T}{(U_1^* + U_2^*)};$$

$$\tau = \tau_1^* - \tau_1 + \Delta T = T \left[\frac{U_1}{(U_1 + U_2)} - \frac{U_1^*}{(U_1^* + U_2^*)} \right] + \Delta T + mT.$$

где $m^* = 0, 1, 2 \dots$ – число полных интервалов T между началами интервалов в разных каналах, в которых происходят переходы через ноль напряжений сигналов [101].

2.1 Анализ погрешностей определения грозового разряда

Для адекватного выделения грозового очага и отсева определенных грозовых разрядов, полученных с большой погрешностью, необходимо повысить точности местоопределения грозового разряда. Для составления алгоритма наиболее точного местоопределения грозового разряда необходимо, в первую очередь, установить точности местоопределения одноpunktовых систем.

Двухпунктовые системы образуются путем соединения двух однопунктовых. С другой стороны, многопунктовые системы грозолокации можно представить в виде образования попарно взаимодействующих двухпунктовых систем. Таким образом, предметом анализа данного раздела являются методы и точности определения местоположения грозовых разрядов при реализации однопунктовых и двухпунктовых систем.

Для анализа точностей однопунктовой системы местоопределения грозовых разрядов рассмотрим принципы работы грозопеленгатора-дальномера, разработанного в ИКФИА СО РАН. Зона покрытия регистратора – круг с радиусом до 1000 км. Однозначность положения разряда определяется расчетом направления прихода электромагнитного сигнала в пункт наблюдения и оценки дальности до его источника.

Система пеленгации, описываемая в [12], состоит из совокупности трех антенн, позволяющих определять электрическую и магнитную компоненты электромагнитного поля радиосигнала грозового разряда.

В этом случае азимут прихода сигнала для такого сигнала определяется как:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n (U_{c-ю,i} - U_{cp, c-ю})^2 - U_{\Phi, c-ю}^2 \right)^{0,5}}{\left(\sum_{i=1}^n (U_{в-з,i} - U_{cp, в-з})^2 - U_{\Phi, в-з}^2 \right)^{0,5}} \right), \quad (2.1)$$

где $U_{cp, c-ю} = \frac{\sum U_{c-ю,i}}{n}$, $U_{cp, в-з} = \frac{\sum U_{в-з,i}}{n}$ – среднеквадратичные значения напряжений сигналов в течение 1 мс от начала атмосферика, принятые с магнитных рамочных антенн, направленных С-Ю и В-З соответственно, n – число отсчетов АЦП по каждому каналу в течение 1 мс, $U_{\Phi, c-ю}$, $U_{\Phi, в-з}$ – фоновые уровни с ортогональных магнитных рамочных антенн, направленных С-Ю и В-З соответственно.

Квадрат напряжения фонового уровня вычитается из среднеквадратичного значения напряжения сигналов по предложению авторов [12] с целью снижения ошибки, которую вносят шумовые компоненты поля в регистрируемые значения.

Дальность L и ее среднеквадратичная погрешность ΔL при однопунктовых наблюдениях с помощью разработанного грозорегистратора по измеренным характеристикам амплитудных и спектральных признаков атмосферика выражаются формулами:

$$L = D \cdot \left(\frac{N_+ \cdot N_-}{E_{\text{ср.кв.}} \cdot H_{\text{ср.кв.}}} \right)^{0,25}, \quad (2.2)$$

где D – нормировочный коэффициент, N_+ и N_- – число положительных и отрицательных полупериодов, E и H – электромагнитные составляющие принятого сигнала атмосферика.

$$\Delta L = D_1 \cdot \left(\frac{N}{U^2 + U_\Phi^2} \right)^{0,5}, \quad (2.3)$$

где U – разность потенциалов на выходе усилительных трактов соответствующих каналов пропорциональная E и H , допуская, что $N_+ = N_- = N$. Усиление каналов подбирается так, чтобы $U_E = U_H = U$. Наиболее полно однопунктовый грозопеленгатор-дальномер и методики определения пеленга и дальнометрии описаны в трудах авторов-разработчиков [102, 103, 104].

Анализируя формулы (2.2) и (2.3) путем построения графиков, показанных на рисунке 2.4, выполненных в математическом пакете Maple 9, видно, что, увеличивая количество полупериодов атмосфериков, уменьшается погрешность определения дальности однопунктового грозопеленгатора [105].

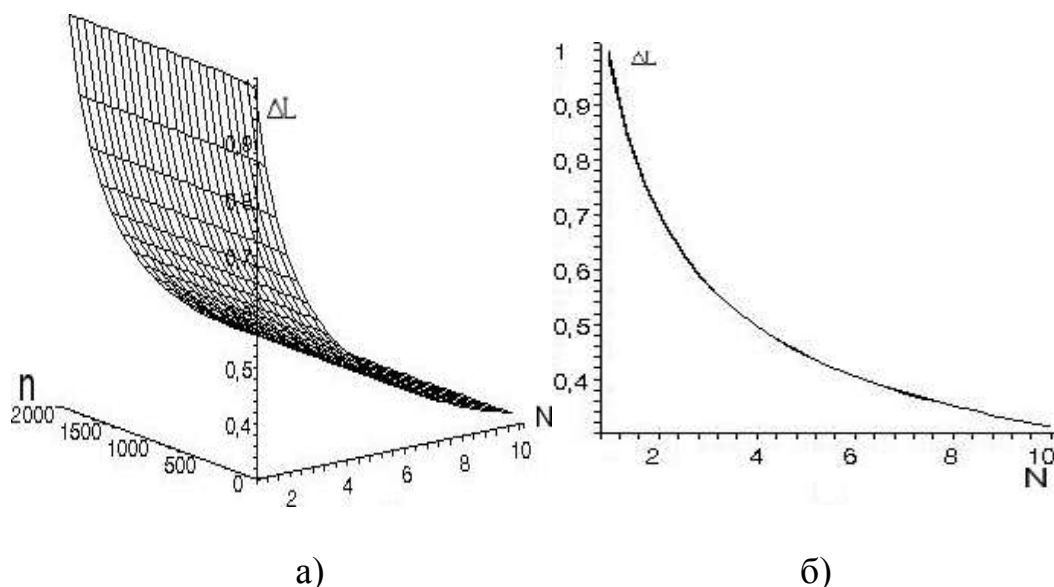


Рисунок 2.4 – Погрешность однопунктного грозопеленгатора $\Delta L < 0,1L$:

а) $\Delta L(N, n)$, где n – количество регистрируемых разрядов,

б) проекция на плоскость $O\Delta LN$

Точность определения направления прихода для однопунктовых систем значительно выше точности определения дальности. Экспериментальная оценка точности определения направления прихода для грозорегистратора, разработанного ИКФИА, показана в работе [1] и составляет $\pm 2,5^\circ$.

При объединении двух однопунктовых систем грозорегистрации необходимо определить направление углов прихода φ_1^* и φ_2^* электромагнитного сигнала и времена прихода t_1 и t_2 грозового разряда в пункты наблюдения. Зная эти данные, можно рассчитать разность времен прихода грозового разряда в пункты наблюдения $T = t_1 - t_2$ и дальность L от одного из пунктов наблюдения до грозового разряда. Для двухпунктовой системы грозолокации возможно использование триангуляционного или гибридного методов определения местоположения грозового разряда [106]. Краткий алгоритм этих методов и их применение на примере однопунктовых грозопеленгаторов LD – 250, расположенных в пунктах г. Якутск и г. Нерюнгри и объединенных в двухпунктовую систему, показаны в работе [1]. Поэтому задача данного пункта главы произвести анализ среднеквадратичных погрешностей различных методов

определения местоположения грозового разряда при постановке двухпунктовой системы.

Триангуляционный метод определения местоположения грозового разряда заключается в решении сферического треугольника, образованного точками, в которых располагаются базы φ_1^* и φ_2^* и, непосредственно, сам грозовой разряд. Определяя значения пеленгов относительно обеих баз и зная расстояние между ними, возможно, вычислить координаты грозового разряда [10].

Грозовой разряд регистрируется одновременно двумя базами. Из всех зарегистрированных двумя базами грозовых разрядов выбираются те разряды, для которых абсолютное значение разности времен регистрации меньше отношения величины базы к скорости распространения радиоволны [99]. Пеленг на базу для каждого пункта регистрации определяется как угол между направлением на север и линией, на которой располагаются пункты регистрации. Два угла сферического треугольника [99] получаются путем вычитания пеленга на базу из соответствующих пеленгов, зарегистрированных сигналов атмосфера. Вершины этих углов находятся в пунктах регистрации, третья вершина находится в месте возникновения грозового разряда. Таким образом, получаются два угла треугольника, вершины которого соответствуют двум пунктам регистрации, а третья вершина – положению грозового разряда. Если условие существования сферического треугольника выполняется, то зарегистрированный разряд определяют два полученных направления из пунктов регистрации. Зная два угла сферического треугольника и сторону (базу), можно вычислить остальные стороны [10], то есть расстояния между каждым пунктом и грозовым разрядом.

По сферической теореме синусов для треугольников выполняется равенство:

$$\frac{\sin l}{\sin \beta} = \frac{\sin L}{\sin \varphi_1},$$

$$\sin L = \frac{\sin l * \sin \varphi_1}{\sin \beta}.$$

Так как $\beta = 180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2)$, то $\sin \beta = \sin(180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2)) = \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$. Учитывая также, что $\sin L = L$ и $\sin l = l$, получаем:

$$L = \frac{l \cdot \sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}. \quad (2.4)$$

Полученная формула справедлива в предположении плоской земли с северным полюсом, расположенным на бесконечности. Расстояние до грозового разряда более точно можно определить, введя поправку β на пеленг φ , которая учитывает истинное положение северного полюса и зависит от географических координат пункта, т.е. $\varphi^* = \varphi - \beta$, где φ – пеленг атмосфера с пункта.

Поскольку применяемая теорема синусов выполняется и для сферических треугольников, то данная формула расчета местоположения грозового разряда подходит и для расчетов с учетом сферичности Земли.

При косвенных измерениях величину ΔL определяют на основании измеренных величин $(\varphi_1, \varphi_2, L)$ и их погрешностей. Погрешности рассчитываем двумя методами: оценивается предельная абсолютная погрешность ошибки и среднеквадратическая погрешность.

Значение измеряемой величины функция от нескольких величин выражается как функция $y = f(\varphi_1, \varphi_2, L)$. Тогда предельная абсолютная погрешность ошибки измерения дальности L от одного пункта в наблюдения до грозового разряда при разностно-временном методе вычисляется по формуле:

$$\Delta f(\varphi_1, \varphi_2, L) = \frac{\partial f}{\partial \varphi_1} \Delta \varphi_1 + \frac{\partial f}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2 + \frac{\partial f}{\partial L} \Delta L.$$

Отсюда дифференциальная оценка ошибки в определении дальности:

$$\Delta L' = \frac{\sin \varphi_1}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)} \Delta \varphi_2 + \frac{\sin \varphi_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)} \Delta \varphi_1$$

Если функция f зависит от нескольких параметров, то среднеквадратическая ошибка определяется формулой [107]:

$$\Delta f(\varphi_1, \varphi_2, L) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \varphi_1} \Delta \varphi_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} \Delta L\right)^2}.$$

Используя это выражение, можно определить среднеквадратическую погрешность в определении дальности L . Расчет среднеквадратичной погрешности определения дальности до грозового разряда при применении триангуляционного метода был произведен на примере работы двухпунктовой системы Якутск – Нерюнгри с расстоянием между пунктами 643 км и ограничением $\Delta L < 0,1l$. Из формулы (2.4):

$$L = \frac{l \cdot \sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)},$$

следует, что:

$$\Delta L = l \cdot \sqrt{\left(\frac{\sin \varphi_1}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)} \cdot \Delta \varphi_2\right)^2 + \left(\frac{\sin \varphi_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)} \cdot \Delta \varphi_1\right)^2}. \quad (2.5)$$

Из произведенного анализ графиков функций (2.4) и (2.5), показанных на рисунке 2.5 и выполненных в математическом пакете Maple 9, следует, что погрешность определения дальности триангуляционного метода с ограничением $\Delta L < 0,1l$ достигается при $\varphi < 2,3$ радиана [105, 108].

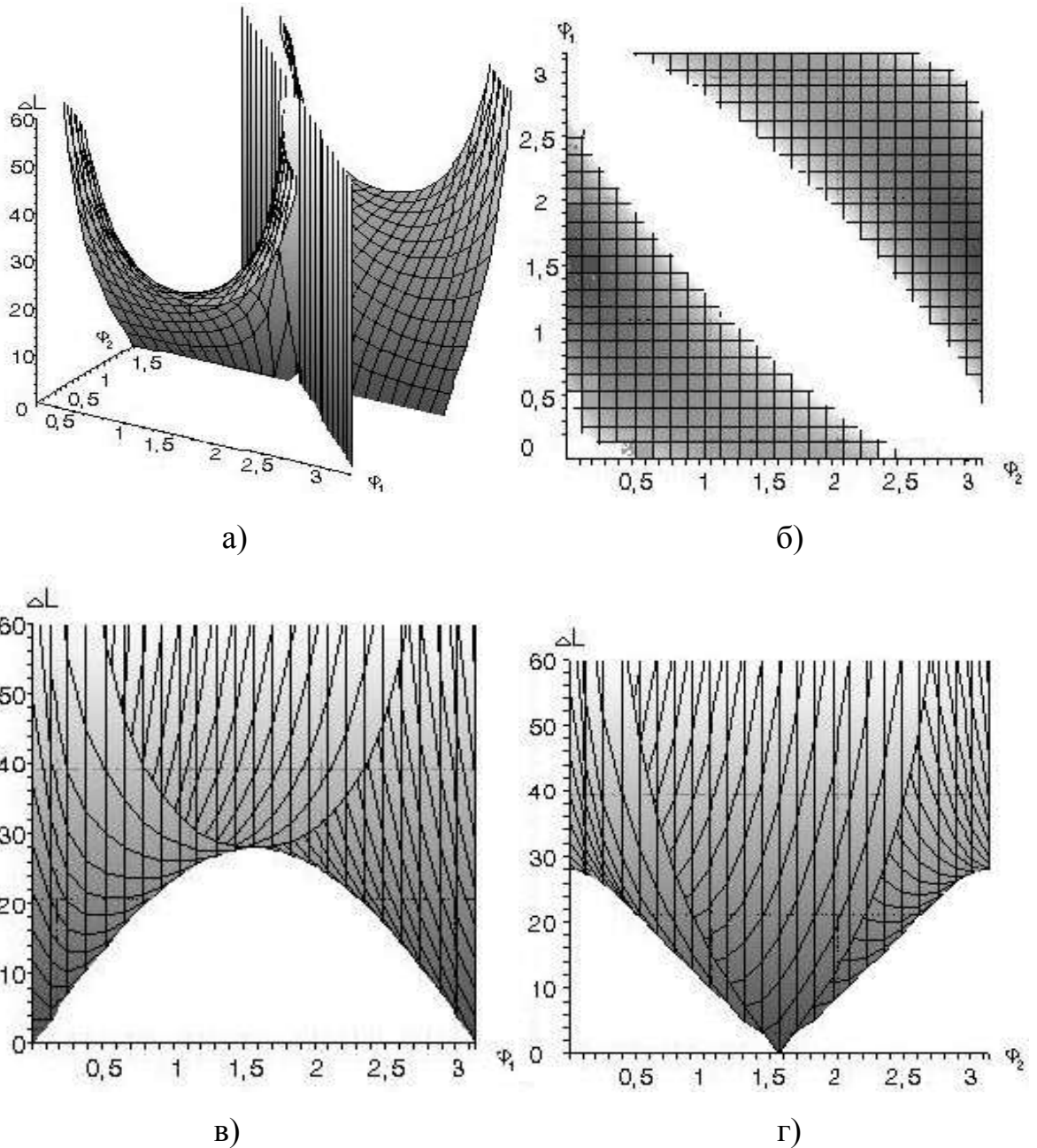


Рисунок 2.5 – Среднеквадратическая ошибка триангуляционного метода:

а) общий вид; б) вид сверху; в) вид относительно оси φ_1 ;

г) вид относительно оси φ_2

Гибридный метод (гиперболическо-угломерный) основан на вычислении местоположения грозового разряда по разнице времени T прихода радиосигнала от грозового разряда в разнесенные пункты регистрации и пеленгам двух станций относительно базы на грозовой разряд. Временем прихода радиосигнала от

грозового разряда принимается время первого превышения порога, равного 0,1 от величины максимума амплитуды принятого радиосигнала [15, 109].

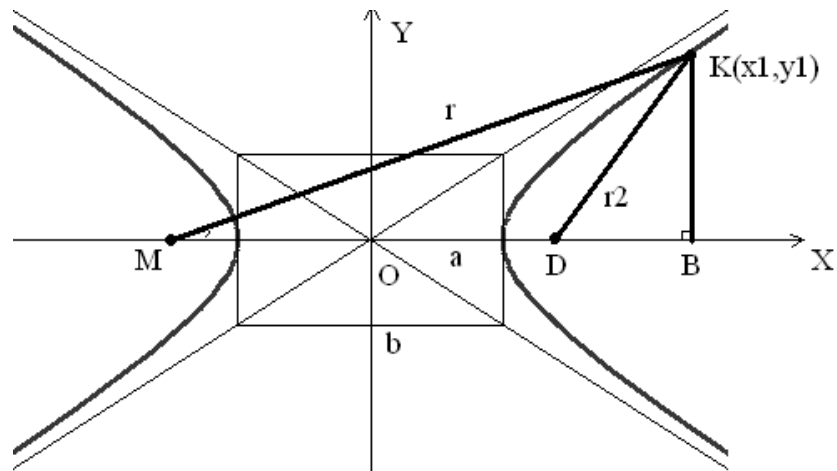


Рисунок 2.6 – Схема применения гибридного метода при определении дальности до грозового разряда

Если поместить пункты наблюдения в фокусы гиперболы M и D , как показано на рисунке 2.6, то точка грозового разряда должна находиться на гиперболе, заданной уравнением:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где a – вещественная полуось, b – мнимая полуось. D – фокусное расстояние и $D = \sqrt{a^2 + b^2}$. Тогда расстояние между фокусами $l = 2D$.

Пусть точка K является одной из точек гиперболы, тогда ее координаты запишутся как:

$$x_1 = l \cdot \cos\alpha - D, y_1 = l \cdot \sin\alpha,$$

отсюда получим, что:

$$l_{1,2} = \frac{D^2 - a^2}{D \cdot \cos\varphi \mp a}. \quad (2.6)$$

Таким образом, получаем два возможных значения расстояния. Если разница времён отрицательна (то есть радиосигнал от грозового разряда пришёл быстрее в пункт регистрации, в котором измерялся пеленг разряда, чем во второй пункт), то из двух значений выбирается меньшее расстояние. В противном случае выбирается большее значение. Далее, как и при использовании триангуляционного метода, зная расстояние до разряда и его пеленг, с помощью сферического треугольника можно вычислить географические координаты источника сигнала [107]:

$$l_{1,2} = \frac{D^2 - a^2}{D \cdot \cos\varphi \mp a},$$

$$D = \frac{l}{2}, a = \frac{T \cdot c}{2},$$

где c – скорость света и D – половина расстояния между пунктами регистрации.

Зная пеленг на грозовой разряд φ и значения осей гиперболы, можно найти расстояние между пунктом регистрации и грозовым разрядом по формуле:

$$L = \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2 - \left(\frac{T \cdot c}{2}\right)^2}{\frac{l}{2} \cdot \cos\varphi - \frac{T \cdot c}{2}} = \frac{l^2 - T^2 \cdot c^2}{2 \cdot (l \cdot \cos\varphi - T \cdot c)}, \quad (2.7)$$

Определим также дифференциальную ошибку определения дальности:

$$\Delta L' = \frac{2 \cdot (l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot l \cdot \sin\varphi}{(2 \cdot l \cdot \cos\varphi - 2 \cdot T \cdot c)} \Delta\varphi + \left(\frac{(l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot c}{(l \cdot \cos\varphi - T \cdot c)^2} - \frac{T \cdot c^2}{l \cdot \cos\varphi - T \cdot c} \right) \Delta t.$$

Среднеквадратичная погрешность гибридного метода определяется как:

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot (l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot l \cdot \sin\varphi}{(2 \cdot l \cdot \cos\varphi - 2 \cdot T \cdot c)^2} \cdot \Delta\varphi\right)^2 + \left(\left(\frac{(l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot c}{(l \cdot \cos\varphi - T \cdot c)^2} - \frac{T \cdot c^2}{(l \cdot \cos\varphi - T \cdot c)}\right) \cdot \Delta t\right)^2} \quad (2.8)$$

Пример расчета среднеквадратичной погрешности определения дальности до грозового разряда гибридным методом для двухпунктовой системы Якутск – Нерюнгри с расстоянием между пунктами 643 км и ограничением $\Delta L < 0,11$ с помощью математического пакета Maple 9 представлен на рисунке 2.7, путем анализа формул (2.7) и (2.8).

Из расчетов следует, что погрешность определения дальности триангуляционного метода с ограничением $\Delta L < 0,11$ достигается при $\varphi < 1,4$ радиана. Причем из сравнения с триангуляционным методом следует, что в этом диапазоне углов погрешность гибридного метода меньше [108].

Вычисление географических координат местоположения грозового разряда по полученным полярным координатам, с центром в одном из пунктов наблюдения производится, используя сферические треугольники.

Для вычисления координат грозового разряда воспользуемся теоремами косинусов [107] и поясняющим рисунком 2.8:

$$\begin{aligned} \cos b &= \cos c \cdot \cos a + \sin c \cdot \sin a \cdot \cos B, \\ \cos a &= \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где B – пункт наблюдения, угол $\angle B$ – угол на грозовой разряд, отсчитанный от направления на север по часовой стрелке, A – северный полюс, C – координаты грозового разряда, a – расстояние до грозового разряда от пункта наблюдения, $\angle(90^\circ - c)$ – широта пункта наблюдения.

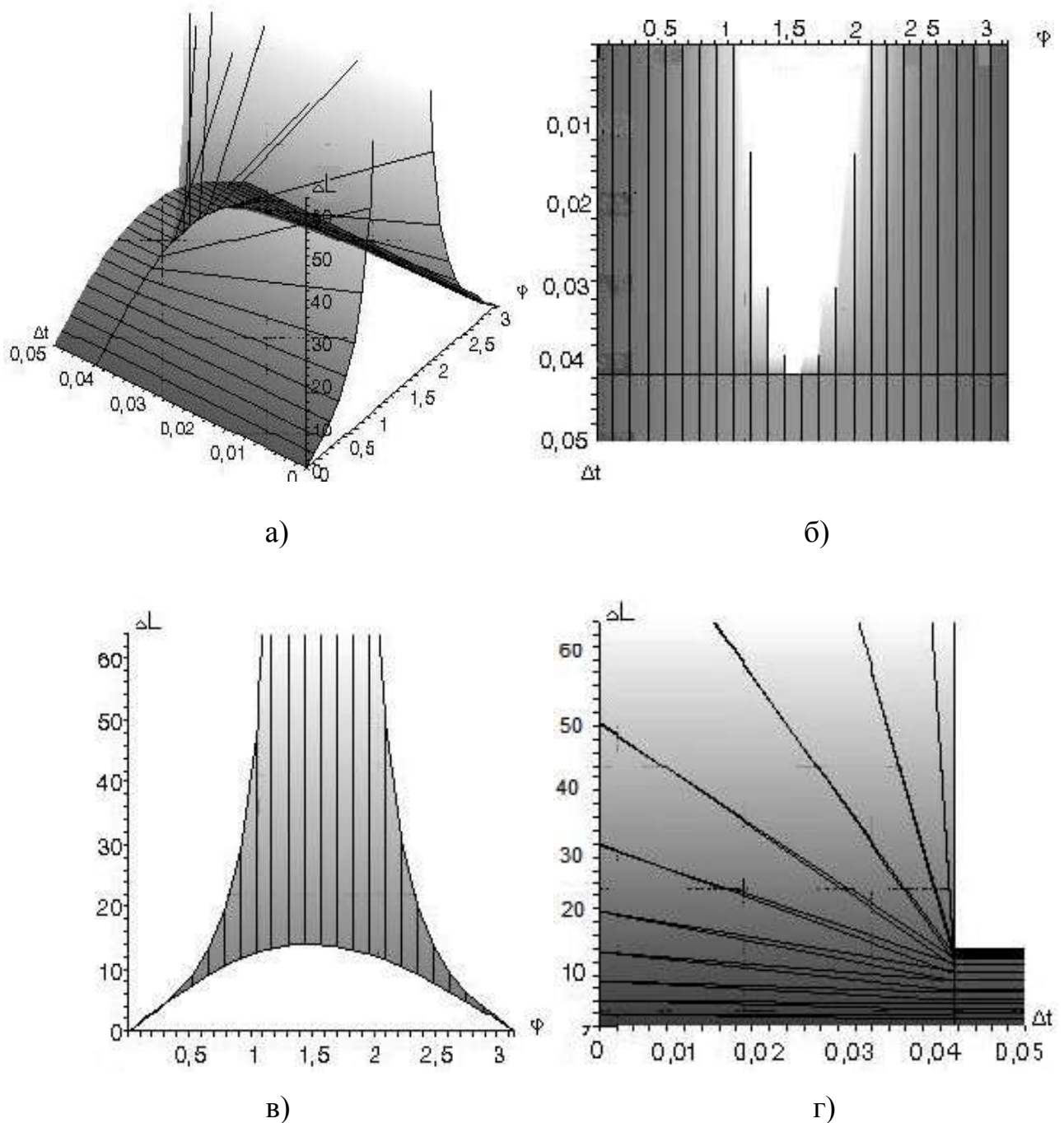


Рисунок 2.7 – Среднеквадратичная погрешность гибридного метода: а) общий вид; б) вид сверху; в) вид относительно оси φ ; г) вид относительно оси Δt

Из формул (2.9) по теореме косинусов найдем b , широта грозового разряда будет равна $90^\circ - b$. Из формул (2.9) по теореме косинусов найдем угол A , его величина и есть приращение долготы грозового разряда относительно долготы

пункта наблюдения. Долгота грозового разряда равна сумме долготы пункта наблюдения и приращения, равного углу A .

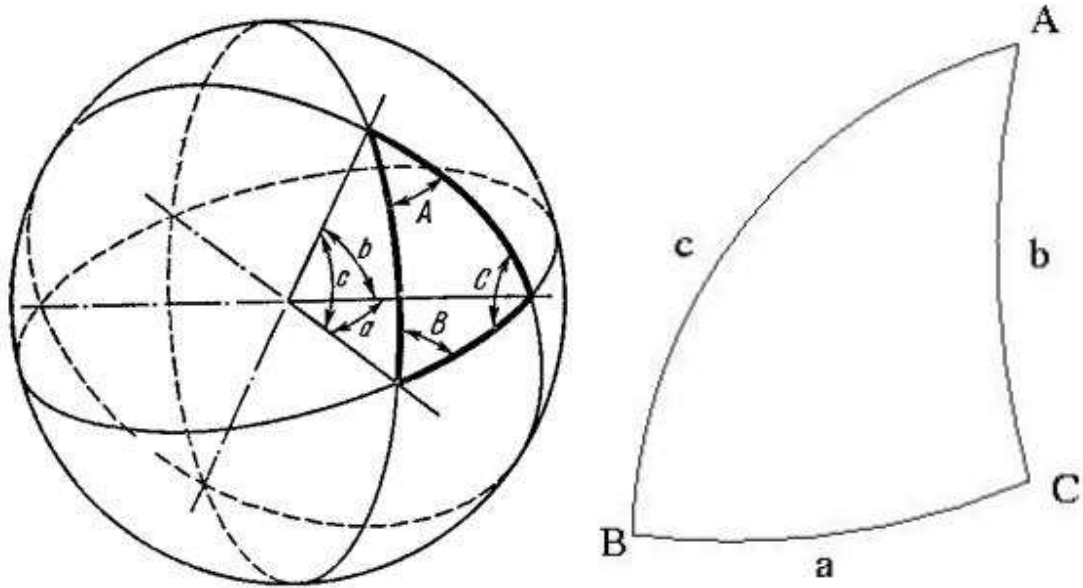


Рисунок 2.8 – Определение географических координат грозового разряда

2.2 Построение рабочей зоны контроля за грозовой активностью

Для реализации двухпунктовой системы грозорегистрации были выбраны триангуляционный и гибридный методы. При этом необходимо производить построение рабочей зоны.

Каждый из однопунктовых грозопеленгаторов работает всенаправленно и его рабочей зоной является окружность с центром в пункте наблюдения. Постановка двухпунктовой системы на базе триангуляционного метода осуществляется следующим образом:

- выбирается место установки пеленгаторов и база пеленгования;
- из точек мест установки пеленгаторов проводятся две дуги радиусом, равным базе пеленгования, и находятся две точки пересечения;
- из точек пересечения проводятся две окружности радиусом, равным базе пеленгования.

Пространство, ограниченное этими окружностями, за исключением зоны пересечения окружностей, является рабочей зоной пеленгования, в которой углы пересечения пеленгов находятся в пределах от $\pi/6$ до $5\pi/6$. Линии окружностей – это линии максимальных ошибок, равных $0,1l$ для очерченной зоны (150км).

Для гибридного метода рабочая зона определяется по ее особенностям, полученным выше из рабочей формулы. Исходя из этого, рабочей зоной для гибридного метода является область в виде ромба, с зоной, ограниченной углами от 0 до $\pi/3$, из каждого пункта, то есть ограниченной линиями пеленгов равных примерно $\pi/3$.

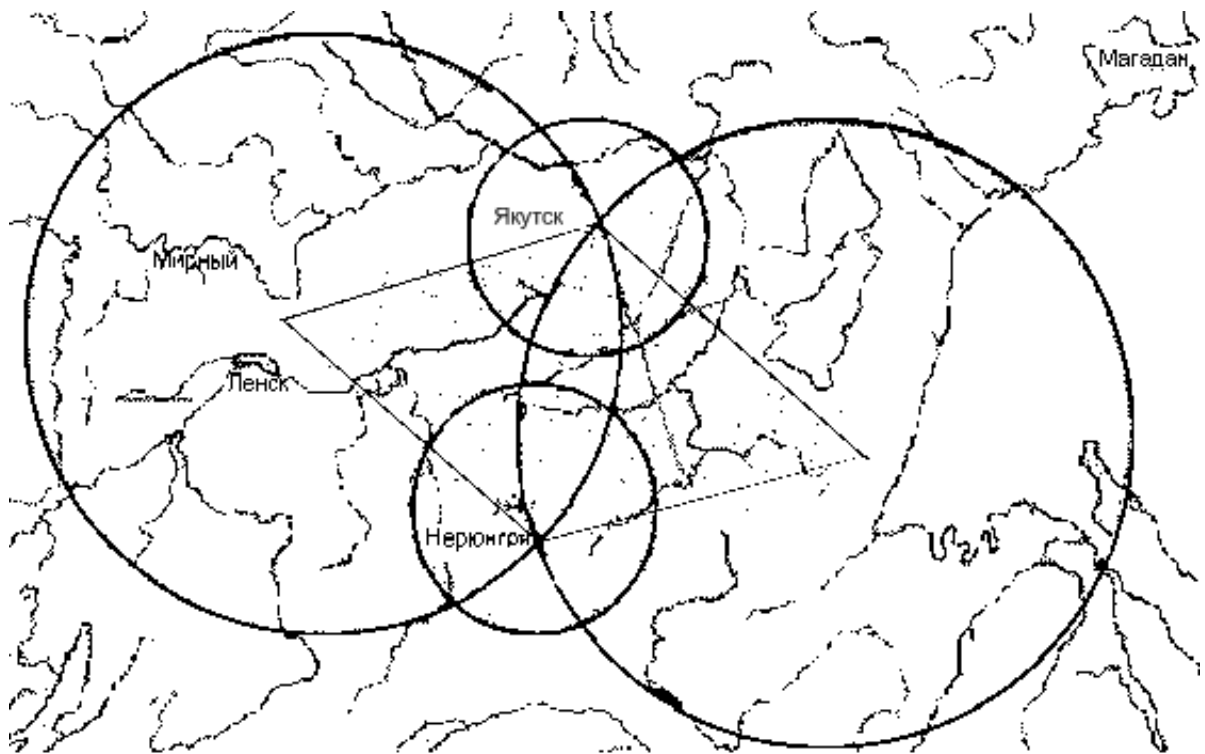


Рисунок 2.9 – Рабочая зона ($\Delta L < 0,1l$) двухпунктовой системы Якутск-Нерюнгри. Большой круг зона триангуляционного метода, малый – однопунктового метода и ромб-гибридного метода

Пример рабочих зон для трех рассмотренных методов (однопунктовый, триангуляционный и гибридный) для пунктов Якутск-Нерюнгри показан на рисунке 2.9 ($\Delta L < 0,1l$). При определенных углах пеленгов необходимо

пользоваться разными методами для получения максимально достижимой точности определения местоположения грозового разряда.

2.3 Метод оптимального определения местоположения грозового разряда для двухпунктовой системы регистрации гроз

Результатом исследования точностей определения координат грозового разряда различными способами является метод, такой, что дальность до грозового разряда определяется в зависимости от угла прихода атмосферика методом, имеющим повышенную точность.

Если отсчитывать углы от линии l , соединяющей два пункта регистрации, то в пределах от 0 до π , при значениях обоих углов менее 1,4 радиана, нужно пользоваться разностно-временным методом. Причем выбирается наименьший по абсолютной величине из двух углов, под которыми наблюдается грозовой разряд из двух пунктов наблюдения. При значениях обоих углов в пределах $1,4 < \varphi < 2,3$ радиан – триангуляционным, а при больших углах, вплоть до π , работает только однопунктовый метод.

Шаг 1. Регистрация и анализ начальных данных.

1. Для каждого пункта по заданному порогу E_z определяем наличие атмосферика, $U_E > U_{пороговая}$.
2. Проводим анализ на отсутствие сигнала на предшествующей атмосферике и двух последующих за ним миллисекундах $U_E < U_{пороговая}$. В случае если $U_E > U_{пороговая}$ и $U_E < U_{пороговая}$ на предшествующей и двух последующих миллисекундах, делаем вывод о наличии атмосферика.
3. Определяем время прихода атмосферика T в канале E_z .
4. Находим U_{max} и уровень $0,1 U_{max}$.
5. Определяем время первого перехода через ноль первого квазиполупериода, превышающего по величине $0,1 U_{max}$ ранее U_{max} .

6. Время определяем, используя известное время начала регистрации и номер такта, соответствующего времени начала первого квазиполупериода атмосфера.

7. Аналогично определяем время последнего перехода через ноль последнего квазиполупериода, превышающего по величине $0,1 U_{max}$ позже U_{max} .

8. Определяем длительность атмосфера по разности времен прихода последнего и первого квазиполупериодов.

9. Определяем углы прихода для каждого из двух пунктов φ_1, φ_2 .

Шаг 2. Анализ на одновременную регистрацию атмосфера обоими пунктами. Если условие $|T_1 - T_2| < \frac{l}{c}$ не выполняется, то рассчитываем координаты грозового разряда по однопунктовой методике для каждого из пунктов. Если условие $|T_1 - T_2| < \frac{l}{c}$ выполняется, то переходим к анализу величин углов прихода.

Шаг 3. Анализ величин углов прихода сигналов φ_1, φ_2 . Исходя из минимального значения углов прихода сигналов, выбираем метод вычисления дальности L : однопунктовый, триангуляционный и гибридный метод.

1. Если $\varphi < 1$, то вычисляем дальность однопунктовым методом.

2. Если $1 < \varphi < 2,3$, то вычисляем дальность триангуляционным методом.

3. Если $\varphi > 2,3$, то вычисляем дальность гибридным методом.

Шаг 3. Вычисление координат грозового разряда.

1. Вводим поправку β на пеленг φ , которая учитывает положение северного полюса относительно направления между двумя пунктами и зависит от географических координат пункта, т.е. $\varphi^* = \varphi - \beta$, где φ – пеленг атмосфера с пункта наблюдения относительно базы между двумя пунктами, β – пеленг базы относительно направления на север.

2. Вычисляем координаты грозового разряда, используя косоугольные треугольники. Широта вычисляется как:

$$90^\circ - \arccos(\cos c \cdot \cos a + \sin c \cdot \sin a \cdot \cos B), \quad (2.10)$$

Долгота грозового разряда равна сумме долготы пункта наблюдения и приращения, равного углу:

$$A = \arccos\left(\frac{\cos a - \cos b \cdot \cos c}{\sin b \cdot \sin c}\right). \quad (2.11)$$

Таким образом, пользуясь выводами теоретической части, предложен метод оптимального определения местоположения грозового разряда [105, 108, 109].

Каждый пункт регистрации электромагнитного импульса грозового разряда отдельно можно рассматривать как однопунктовую систему местоопределения, а их объединение реализует набор двухпунктовых систем. Предложенный алгоритм позволяет использовать совокупность однопунктового, триангуляционного и гибридного методов для вычисления дальности с оптимальной точностью. Эффективность данной методики подтверждается аналитическими расчетами среднеквадратичных погрешностей определения дальности для каждого из представленных методов.

2.4 Метод выделения грозового очага

Для разделения экспериментально зарегистрированного массива грозовых разрядов с целью выделения грозовых объектов и описания их основных параметров применим и адаптируем комбинации известных методов кластерного анализа.

Пусть множество $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ обозначает n объектов, в нашем случае грозовых разрядов, принадлежащих некоторой популяции π , где π – совокупность грозовых разрядов за любой интервал времени. При этом каждый объект I_j из множества грозовых разрядов обладает некоторым набором наблюдаемых характеристик-признаков. При решении задач классификации грозовых разрядов с одной стороны можно представлять вектор признака двумя координатами (координаты грозового разряда XU), в этом случае предлагается производить

сечения по оси времени с заданными интервалами для рассмотрения грозовой активности в динамике. Другой вариант заключается в представлении вектора признака тремя координатами, включая время прихода сигнала грозового разряда t . Результаты измерений признаков грозовых разрядов представим в виде векторов $X_j = (x, y, t)$ или $X_j = (x, y)$. Данное множество X – есть n точек (разрядов) в евклидовом пространстве.

Для решения выделения грозового очага предлагается использование евклидовой метрики, поскольку ее употребление отвечает интуитивным представлениям о близости объектов исследования. Это наиболее часто используемая метрика [48, 110] для достижения схожести компонентов нагрузки в каждом классе.

Грозовая ячейка – событие, происходящее в сравнительно небольшом промежутке времени (минуты, часы), поэтому целесообразно рассматривать не двумерный вектор признаков, где координаты XU этого вектора являются координатами грозовых разрядов, а вводить в рассмотрение третью координату – время t . В связи с этим в качестве метрики вводим взвешенное евклидово расстояние, где подбором весов произведем нормировку осей пространства.

Учитывая вышесказанное, для определения расстояния между грозовыми разрядами $I_i(x_i, y_i, t_i)$ и $I_j(x_j, y_j, t_j)$ вводится взвешенное евклидово расстояние:

$$d(X_i, X_j) = \left(\sum_{k=1}^n w_i (x_{ki} - x_{kj})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.12)$$

в нашем случае:

$$d(I_i, I_j) = \sqrt{w_x(x_i - x_j)^2 + w_y(y_i - y_j)^2 + w_t(t_i - t_j)^2}. \quad (2.13)$$

Принято считать, что наилучшее приближение получается путем усреднения всех результатов измерений с весами: $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$, поэтому в качестве веса, для измерений были приняты:

$$\begin{aligned} w_x &= \frac{1}{\sigma_x^2}, \\ w_y &= \frac{1}{\sigma_y^2}, \\ w_t &= \frac{1}{\sigma_t^2}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где σ_x^2 , σ_y^2 , σ_t^2 – эмпирические (выборочные) дисперсии признаков X и t соответственно, вычисляемые по формуле [111]:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \\ \sigma_t^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Устойчивость кластеризации характеризуется одинаковым разбиением на кластеры, как при использовании различных методов, так и различных мер схожести объектов. Поэтому, предлагается дополнительно, в качестве своеобразного теста, включить и расстояние Махаланобиса:

$$D^2(I_i, I_j) = (I_i - I_j)^T C^{-1} (I_i - I_j), \quad (2.16)$$

где $(I_i - I_j)$ и $(I_i - I_j)^T$ – прямой и транспонированный векторы расстояний между двумя классами, C^{-1} – обратная матрица к матрице межгруппового рассеяния.

В многомерном случае элементы обратной матрицы, являющейся несмещенной оценкой ковариационной матрицы, вычисляются по следующей формуле:

$$c_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j), \quad (2.17)$$

где i, j – количество элементов класса, $(x_{ki} - \bar{x}_i)$ и $(x_{kj} - \bar{x}_j)$ – отклонения значений переменных класса от общего среднего.

2.5 Первичная кластеризация грозовых объектов методом ближайшего соседа

Первичная кластеризация грозовых объектов осуществляется с помощью алгоритма ближайшего соседа, по-другому называемого методом минимального локального расстояния. Устойчивость кластеризации в предложенном алгоритме достигается аналогично методике, применяемой в методе k -средних. Алгоритм состоит из последовательности следующих действий.

Шаг 1. Пусть обучающая выборка $I_k = \{I_1, \dots, I_n\}$ образует множество кластеров $\{I_1\}, \dots, \{I_n\}$, каждый из которых представлен как $I_i(x_i, y_i, t_i)$. Составляем матрицы попарных расстояний между объектами $d(I_i, I_j)$:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаг 2. Поиск наименьшего элемента матрицы попарных расстояний:

$$d_1(I_i, I_j) = \min d(I_i, I_j).$$

Шаг 3. Классифицируемый объект I_i относится к тому же классу Y_j , которому принадлежит ближайший объект обучающей выборки I_j , если расстояние между кластерами не превышает 75 км, таким образом, объекты I_i, I_j объединяются и образуют новый кластер.

Шаг 4. Найдем координаты центра тяжести полученного кластера $\mu_i(X_{ic}, Y_{ic}, t_{ic})$:

$$\begin{aligned} X_{ic} &= \frac{1}{m} \sum X_{ik}, \\ Y_{ic} &= \frac{1}{m} \sum Y_{ik}, \\ t_{ic} &= \frac{1}{m} \sum t_{ik}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Шаг 5. Количество кластеров на этом шаге – $(n - 1)$. Далее строится новая матрица расстояний, которая будет иметь размерность $(n - 1) \times (n - 1)$, снова находится минимальное локальное расстояние между двумя кластерами и такие кластеры объединяются в один. Условием остановки являются:

- $\min d(I_i, I_j) > 75$ км – расстояние между отдельными кластерами не меньше, чем 75 км;
- $n \geq 6$ при $t \in [0, 1]$ – грозовой кластер образует кластер, в котором число разрядов в течение одного часа не меньше 6.
- при этом на каждом шаге пересчитываются центры кластеров, что позволяет ввести функционал качества кластеризации. Сумма средних внутри кластерных расстояний должна быть как можно меньше:

$$\Phi_0 = \sum_{y \in Y} \frac{1}{|I_y|} \sum_{i, y_i=y} d(I_i; \mu_y) \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

где $I_y = \{I_i \in I_k | y_i = y\}$ – кластер с номером y .

Предельные характеристики – количество элементов кластера и расстояние – определяются с помощью экспертной оценки и данных радиолокационных методов измерения характеристик грозовых объектов [2]. В [2, 79, 112] скорость движения грозовых ячеек определяется в среднем 30-40 км/час. Средний радиус грозового очага по тем же данным составляет порядка 20-40 км. Отталкиваясь от этого и учитывая часовое объединение разрядов, а также опыт других исследователей [8, 113], было принято условие по дальности для выделения грозового очага 75 км.

Используемая процедура анализа является прямым методом алгоритма кластеризации [46] и результатом проведения данной процедуры является небольшое количество относительно больших размеров кластеров.

2.6 Модальный анализ Уишарта для выделения грозовых ячеек в случае их перекрытия

Применение для кластеризации грозовых объектов метода минимального локального расстояния может не только привести к удлинению кластеров, но и, благодаря цепной тенденции, к выделению ряда «плотных» кластеров, которые перемежаются, соединяются «редкими, неплотными» кластерами [48]. Тем временем, существует несколько базовых подходов к определению количества кластеров в множестве данных при оценивании плотностей распределений [114, 115]. В работе Уишарта [116] предложен метод кластеризации, называемый модальным анализом. Здесь количество кластеров определяется как общее число непересекающихся областей, чьи плотности превышают заданное значение.

Анализ выделенных грозовых очагов методом минимального локального расстояния с использованием экспериментально полученных данных показывает, что гистограммы частот попадания точек в интервалы группировки часто имеют вид мультимодального распределения. Методами модального анализа, возможно, выделить области локальных экстремумов функции плотности распределения

элементов кластера [116] и получать кластеры, под которыми можно понимать грозовые ячейки отдельного очага. Этот метод позволит снизить уровень шума на границах пересекающихся кластеров и удалить изолированные атмосферники. На выходе разбиение множества грозовых разрядов будет более «качественным» в сравнении с применением только метода минимального локального расстояния.

Процедура модального анализа начинается с выяснения вопроса о мультимодальности данных. В случае одной характеристики необходимо построить гистограмму и вычеркнуть данные с малой частотой (седловые области). Тогда соответствующий кластер можно установить для каждой модальной области. Данные, принадлежащие седловой области, относим к ближайшей моде. В случае равноудаленности седловой области от мод, эта область делится пополам, и половины относятся к левостоящему и правостоящему кластерам.

Рассматривая отдельные области кластера, в работе [116] левостоящая область относительно моды определена как «подъем» (область подъема), правостоящая область относительно моды - «спуск» (область спуска). В случае нескольких (два и более) подряд стоящих интервалов с приблизительно одинаковой частотой эта область определяется как «долина». Если максимальное значение частоты образует долину, то, очевидно, что имеется повышенная плотность сгущения точек относительно центра кластера, равно как и в случае крутого подъема и спуска. В случае образования долины в области минимальных значений частот получаем отчетливо разделенные кластеры при мультимодальном распределении.

Перенесем методы модального анализа на случай двух характеристик, когда грозовой разряд представляется как $X_j = (x, y)$. Данный метод применяется для каждого из полученных кластеров I_j [117, 118]. Для этого центр оси предполагаемого эллипса, огибающего кластер, помещается в центр рассматриваемого кластера I_j , являющегося кандидатом на разбиение. В первоначальном состоянии ось вращения совпадает с направлением на восток в

системе земных координат применительно для грозовых разрядов. Следующим этапом необходимо распределить элементы кластера по интервалам группировки, каждый из которых будет содержать некоторый диапазон значений изучаемого признака. Под признаком понимается проекция удаленности грозового разряда, принадлежащего данному кластеру от центра кластера.

Для того чтобы имелась возможность выделить минимум две моды M_1 и M_2 и седловую область G , необходимо, чтобы минимальное число разбиений было не менее трех, а количество точек рассматриваемого кластера – не менее 15 [117], так как в случае нахождения в седловой области хотя бы одного элемента, соседний интервал, содержащий моду, должен отличаться минимум на 2σ стандартных отклонения.

Предполагаем, что закон распределения плотности грозовых разрядов пуассоновский, поскольку, описывает вероятностное распределение дискретного типа, а при регистрации грозовых разрядов в разбиваемых интервалах часто содержится малое число элементов.

Для закона распределения Пуассона стандартное отклонение равно \sqrt{n} , следовательно, минимальное значение элементов в таком интервале $n = 7$. Если же количество элементов рассматриваемого кластера меньше 15, то считаем, что для него модальный анализ не применим, и данный кластер оставляем без изменения.

Если количество элементов больше 15, то выбирается количество интервалов разбиения k оси X таким образом, чтобы в каждом интервале было не менее 5 элементов. Длины интервалов по оси X примем равными, и ширину интервала определяем по общепринятой формуле Стерджеса [119]:

$$h_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{k}. \quad (2.20)$$

Тест на мультимодальность проводим следующим образом. После построения гистограммы частот, производится сортировка интервалов разбиения

по убыванию в нем частот попадания элементов. Интервал с наибольшим значением частоты считается интервалом «главной» моды. Предполагается, что интервал со следующим максимальным значением есть интервал, содержащий выборочную моду, при условии, что она не принадлежит интервалу, смежному с интервалом «главной» моды. Определяется наличие седловой области G между ними, отличающейся по значению частот в ней от обеих мод больше, чем на 2σ . Если такая область существует, то она отмечается как первая седловая область G_1 . Далее или в случае отсутствия седловой области, удовлетворяющей выдвинутым условиям, рассматривается следующее значение предполагаемой моды.

Из всех седловых областей находится самая протяженная, такая, что количество элементов в одном из интервалов этой области минимально относительно других таких областей. Граница расщепления будет проходить в том интервале, где имеется наименьшая частота. Элементы, принадлежащие интервалу, относятся к тому кластеру, в который входит ближайшая мода. В случае равноудаленности, область делится пополам, и половины относятся к левостоящей и правостоящей модам. За центры двух новых полученных кластеров принимаются их центры тяжести.

Очевидно, что при вращении оси, на гистограммах распределения частот попадания точек в интервал, можно увидеть, как «наслоение» кластеров, так и относительно хорошо разделенные кластеры. Вращение проводим с шагом $2,5^\circ$. Выбор шага изменения угла обусловлен тем, что стандартное отклонение погрешности пеленгования составляет $2,5^\circ$ приблизительно для всех направлений (точность определения угловой координаты для грозопеленгаторов [4, 5, 6, 7]). При этом для каждого угла строятся гистограммы частот по оси вращения, для анализа на мультимодальность.

После изменения угла от 0 до 2π имеем характеристики мультимодальности: различным углам соответствует определенное количество пиков (локальных экстремумов – локальных мод), которые определяются с помощью вышеуказанного теста на мультимодальность.

На выходе мы имеем два массива, содержащие количество элементов мод $M_i, i = \overline{1, n}$ и седловых областей $G_j, j = \overline{1, m}$.

Оптимальный угол α разбиения находится исходя из следующих условий:

$$\begin{aligned} len G &\rightarrow \max, \\ m &\rightarrow \min, \\ \frac{n}{m} &\rightarrow \max. \end{aligned} \tag{2.21}$$

То есть, определяем седловую область наибольшей протяженности, с наименьшим количеством элементов в каждом интервале области, а также с максимальным отношением между значением моды и минимальным значением в седловой области. При оптимальном угле α проводится разбиение на кластеры. Граница рассекания проводится аналогично вышеописанному.

Далее для каждого нового кластера проводится итерационная процедура разбиения до тех пор, пока в каждом из рассматриваемых кластеров не окажется менее 15 элементов. В этом случае процедура считается законченной, а разбиение на кластеры – окончательным.

Применение модального анализа имеет смысл, так как границы грозовых ячеек и очагов становятся более «естественными», что подтверждают данные радиолокационных исследований [120], и соответствуют визуальному восприятию, используемому в практике в настоящее время.

Таким образом, для классификации грозовых разрядов рекомендуется применять последовательно два метода кластерного анализа [117, 122]. Поскольку применение последовательно двух методов позволяет исключить часть элементов, входящих в небольшие кластеры, из дальнейшего рассмотрения, так как предполагаем, что их местоопределение сделано с большими погрешностями. Первичная кластеризация осуществляется с помощью метода минимального локального расстояния. Вторым этапом проводится кластеризация методами

модального анализа, которая также позволит снизить уровень шума на границах пересекающихся кластеров и удалить изолированные атмосферники.

2.7 Параметры грозового очага

Структурный подход моделирования позволил выделить из массива грозовых разрядов конкретные грозовые объекты, и грозовой очаг определяется массивом точек в многомерном пространстве координат (X_i, Y_i, t_i) .

Выделение грозового очага преследует цель определить его основные параметры. Адекватность полученного массива векторов-признаков, определяющих грозовой очаг, определяет его совпадение с оригиналом с приемлемой точностью, то есть совпадением значений выходных параметров и объектов [123]. Для этого необходимо определить основные параметры грозового очага.

После выделения грозового очага определяем параметры полученных кластеров. Центр грозового очага вычисляем как «центр тяжести» кластера по формулам (2.18):

$$\begin{aligned} X_{ic} &= \frac{1}{m} \sum X_{ik}, \\ Y_{ic} &= \frac{1}{m} \sum Y_{ik}, \\ t_{ic} &= \frac{1}{m} \sum t_{ik}. \end{aligned}$$

Движение центра активности грозового облака – это смещение центра плотности грозового объекта [2]. Следовательно, скорость смещения центра активности грозового очага от временного интервала к следующему временному интервалу определяется не только перемещением грозовых облаков, но и перемещением центра активности внутри очага. Разница в расположении центров плотности в течение двух последовательных часовых выборок по конкретной области характеризует смещение грозового очага в течение часа:

$$D = \sqrt{(X_{ic} - X_{jc})^2 + (Y_{ic} - Y_{jc})^2}. \quad (2.22)$$

Зная длительность существования грозовых объектов и расстояние между центрами плотности в начале и в конце грозовых процессов, определяется среднее значение их скорости движения [1, 123].

Длительность существования грозы определяется продолжительностью ячеек, из которых гроза состоит. Учитывая, что продолжительность жизни грозовой ячейки около тридцати минут, иногда до одного часа [74], следует наблюдать за перемещением центра плотности грозовой активности внутри ячейки с интервалом не более 15 минут в течение часа. За меньший временной интервал статистика разрядов в грозовом объекте слишком мала.

Наибольшее расстояние между элементами грозового кластера определяется для вычисления его площади. Для этого необходимо определить центр тяжести кластера, который будет являться центром декартовой прямоугольной системы координат, связанной с кластером. Одна из координатных осей будет проходить через центр тяжести кластера параллельно прямой, соединяющей две самые отдаленные друг от друга точки кластера.

Для повышения точности определения площади грозового объекта с обеих сторон от проекций наибольших расстояний по обеим осям удаляются 2,5% (95% доверительный интервал). Как правило, границы типичных грозовых объектов имеют очертания эллипса, в ряде случаев окружность [120]. Поэтому площадь области находится как площадь эллипса:

$$S = \pi ab, \quad (2.23)$$

где a и b – соответственно, большая и малая полуоси эллипса.

Эксцентриситет эллипса может быть выражен соотношением:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}},$$

и показывает, насколько идеальная форма, аппроксимирующая линию контура грозового очага, далека от окружности. Эксцентриситет эллипса характеризует степень вытянутости эллипса. Чем ближе эксцентриситет к нулю, тем больше эллипс похож на окружность и чем ближе эксцентриситет к 1, тем сильнее вытянут эллипс.

Время жизни грозовой ячейки и очага в различные промежутки времени определяется как разность времен начала и конца грозовой деятельности. Интенсивность грозового очага – это отношение количества разрядов в грозовом очаге на единичную площадку в единицу времени.

Выводы к главе

Таким образом, грозовой очаг может быть определен большим набором его параметров, характеризующих грозовую деятельность. В данной работе за набор параметров, определяющих грозового очага, помимо массива координат разрядов, будем принимать значения координат центров грозового очага и значения больших и малых полуосей модельных эллипсов. Остальные параметры принимаем производными, поскольку их отыскание не трудоемко.

3 ПАРАМЕТРЫ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ГРОЗОВОГО ОЧАГА

Выделенный с использованием предложенных методов и реализующих их алгоритмов грозовой очаг включает не все признаки и свойства реального грозового очага, а только те, которые определяют его геометрические характеристики и степень опасности изучаемого процесса. Эта модель, несомненно, гораздо проще, чем реальный процесс. Тем не менее, это качество не умаляет достоинства предложенной методики выделения грозового очага, а только упрощает процесс алгоритмизации и его реализацию в виде программы для ЭВМ.

3.1 Вычислительная реализация алгоритма выделения грозового очага

Описанные в данном разделе алгоритмы реализованы в программе для ЭВМ «Программа для кластеризации грозовых разрядов» [124].

Разработанная программа предназначена для выделения массива данных, определяющих грозовой очаг, для оценки модельных параметров очага для исследуемой территории, для исследования плотности распределения грозовых разрядов и пространственно-временного распределения, а также для визуализации полученных данных.

Программа работает в среде операционных систем от Microsoft Windows 98 Professional до Microsoft Windows 7 Professional. Для отображения в 3D используется программа DrawPoint3D.exe (данная программа должна находиться в одном каталоге с программой кластеризации). Программа написана на языке программирования Object Pascal в среде Delphi 7.

Ключевыми функциями, разработанной программы [124], являются загрузка исходного текстового файла экспериментальных данных определенного формата, их просмотр и кластеризация. В программе предусмотрена возможность объединения нескольких файлов в один, а также реализован просмотр с разбиением по времени (разделение всего файла на интервалы), просмотр плотности данных на временной шкале и в проекции на *OXY*, просмотр данных в *3D*, просмотр кластеризованных данных с отображением эллипсов доверительных областей.

Программа основана на объектно-ориентированной архитектуре и включает следующие основные процедуры и функции:

`LoadFileClick` – процедура загрузка данных;

`DrawMain` – процедура отображения исходных данных;

`ButtonFirstDrawClick` – процедура заполнения информационной таблицы (количество точек, центр кластера, площадь, длительность по времени и прочее) и отображение кластеров на графике;

`ButtonEllipsesClick`, `ButtonEllipsesClick5`, `ButtonEllipsesClick33` – процедуры отображения эллипсов (разного размера в зависимости от процедуры) доверительных областей на графике с кластеризованными данными;

`ButtonFirstDraw3DClick` – процедура отображения кластеров в *3D*;

`CopyInfo` – процедура копирования данных из информационной таблицы в буфер обмена;

`ButtonViewCurrentInterval` – просмотр данных на текущем интервале времени;

`ButtonFirstCluster` – процедура кластеризации на основе иерархического метода одиночной связи.

Программа состоит из одной запускаемой формы и не имеет других составных частей. Для отображения в *3D* используется программа `DrawPoint3D.exe`. Общий алгоритм программы представлен блок-схемой, изображенной на рисунке 3.1.

Используемые технические средства. В состав используемых технических средств входит: IBM PC, процессор – Pentium или Celeron с тактовой частотой не ниже 166 МГц (рекомендуется Pentium II 400 МГц), оперативной памяти – 128 Мбайт (рекомендуется 256 Мбайт).

Вызов и загрузка программы осуществляются через исполняемый файл projectSh.exe, размер исполняемого файла – 761 КБ.

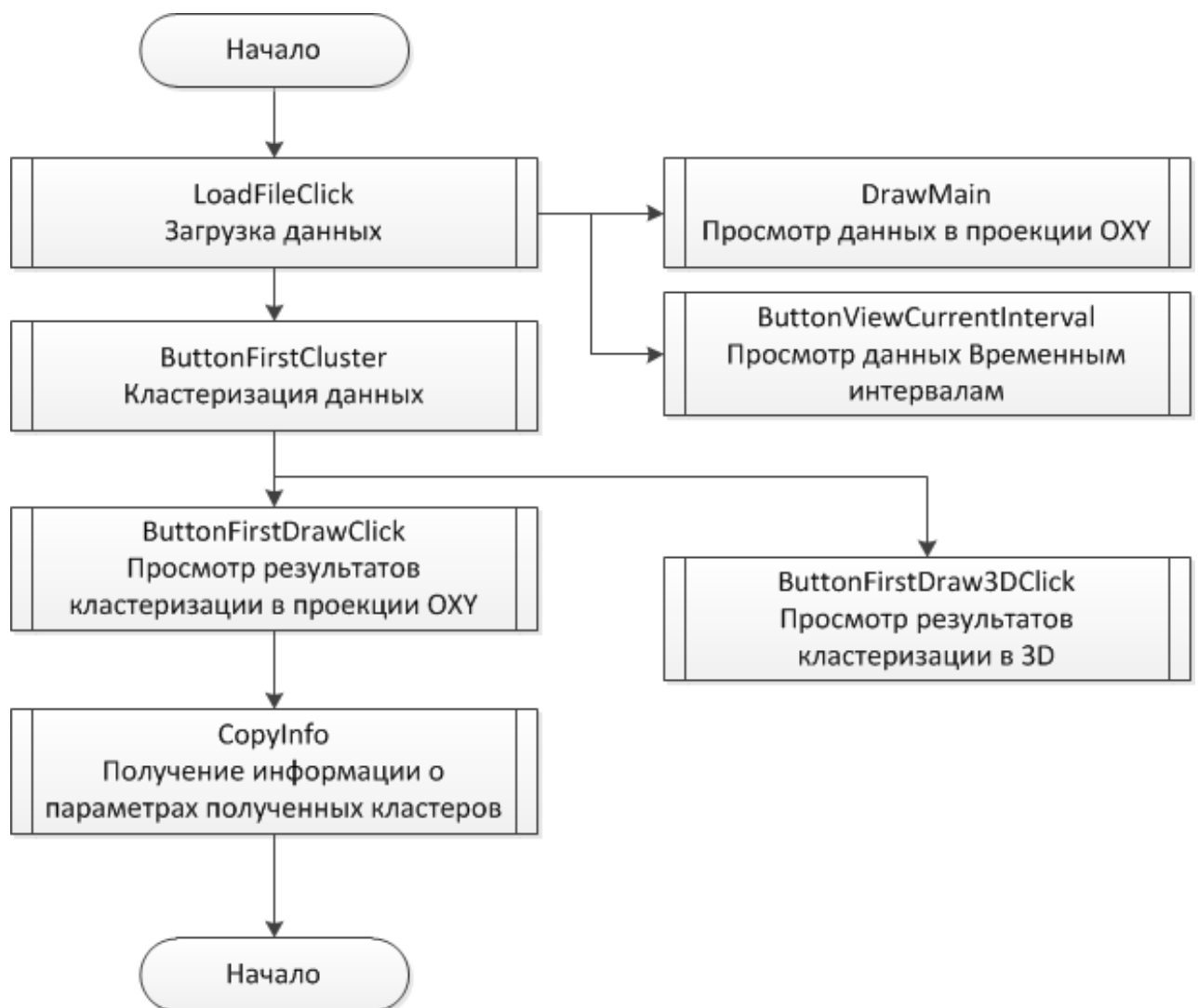


Рисунок 3.1 – Блок-схема общего алгоритма работы программы

3.2 Реализация основных вычислительных процедур и функций

Метод ближайшего соседа является иерархическим алгоритмом кластеризации, предназначен для автоматической или полуавтоматической

классификации объектов [125]. Его временная сложность составляет $O(N * \ln N)$. Исходя из качественного сравнения алгоритмов, рассмотренных в работе [125], этот метод характеризуется удовлетворительным быстродействием и предъявляет требования к объему памяти.

Преимущество метода ближайшего соседа состоит в том, что он прост в исполнении, находит кластеры произвольной формы и кластеризация осуществляется при неизвестном количестве кластеров и не требует значения их количества.

В использованном методе при расчете матрицы расстояний между кластерами реализована возможность применения трех разных метрик: Евклидова метрика, нормированная Евклидова метрика (позволяет нормировать параметр «время», что дает возможность выделять кластеры разной продолжительности по времени), расстояние Махаланобиса.

3.3 Описание работы программы кластеризации грозовых разрядов

Входными данными программы являются полученные данные о грозовом разряде, которые представлены в виде файла с расширением .txt. Каждый такой файл содержит информацию о времени регистрации атмосферика в формате чч.мм.сс, а также координаты его местоположения в декартовой прямоугольной системе координат центром которой является пункт регистрации, а ось X параллельна экватору. Размерность осей – пиксели. Подход к кластерному анализу с использованием пикселей применяется при анализе карт, полученных по спутниковым данным [91]. Пиксели в дальнейшем переводятся в декартовые пространственные координаты на плоскости Земли. Текстовый документ формируется за суточный период от 00:00:00 до 23:59:59 местного времени.

Выходными данными являются параметры, определяющие грозовой очаг: отобранный массив также в виде файла с расширением .txt, в каждом из таких файлов содержится информация о времени регистрации атмосферика и координаты его местоположения. Помимо набора координат грозового разряда

после работы программы мы получаем сведения о геометрии грозового очага: координаты его центра и значения больших и малых полуосей модельных эллипсов.

Программа для обработки данных реализована в привычном для многих пользователей интерфейсе, показанном на рисунке 3.2. В левой части окна главной формы содержатся следующие элементы интерфейса:

- опция для загрузки файла с данными;
- окно информации;
- окно-таблица, в которой будет отображена информация о полученных кластерах при тех или иных методах кластеризации, а именно, их количество, количество элементов в кластере, координаты центра кластера, его площадь, максимальное расстояние между элементами, время его жизни. Ниже таблицы располагается кнопка осуществляющая действие копирования ее в буфер.

- окно визуализации результатов, которое дает возможность показывать результаты кластеризации при различных количествах элементов в нем и проводить границы каждого из полученных разбиений при различных доверительных интервалах.

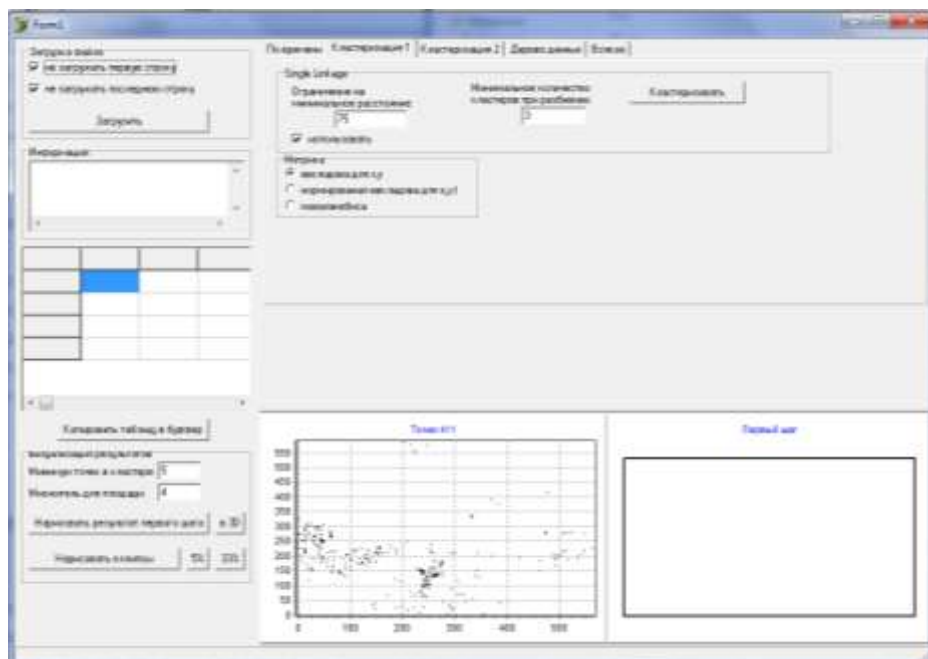


Рисунок 3.2 – Главная форма пользовательского интерфейса

В правой части окна главной формы пользовательского интерфейса содержится четыре основные вкладки.

Первая вкладка «По времени» (рисунок 3.3) позволяет рассматривать интенсивность грозовых разрядов в заданном интервале времени с заданным шагом, строить гистограмму частот грозовых разрядов в заданном интервале времени, строить и отображать карту плотности распределения грозовых разрядов в заданном интервале времени.

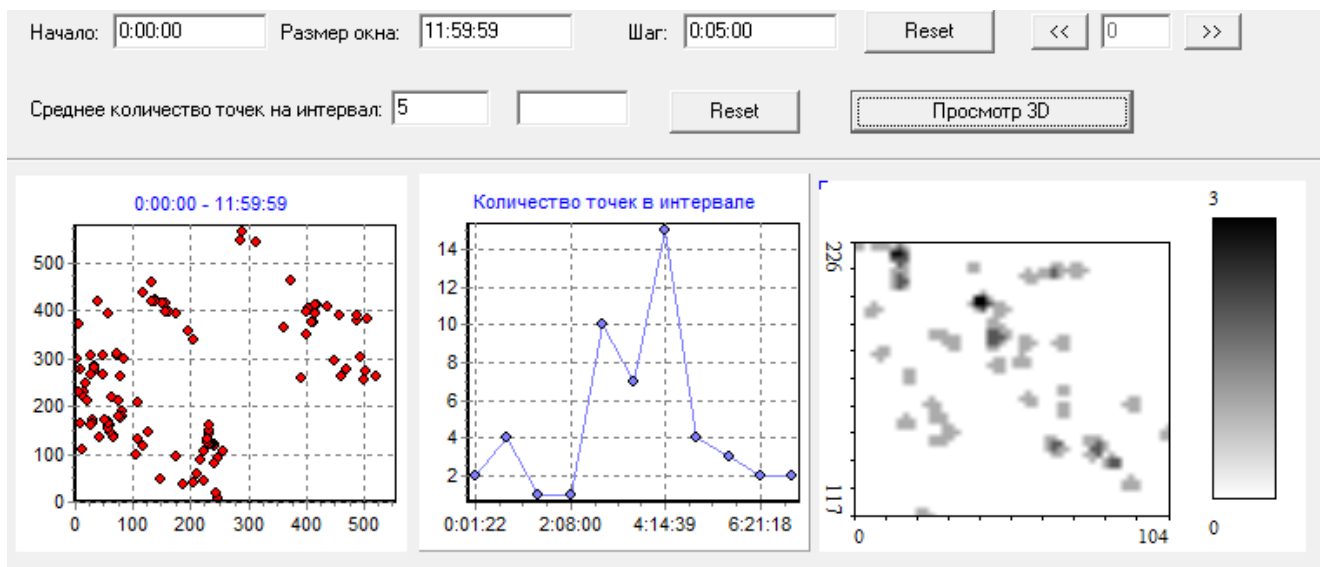


Рисунок 3.3 – Пример построения карт интенсивности во времени, гистограмм частот и карты плотности за заданный интервал времени

Также имеется возможность 3D-визуализации в приложении Draw Point 3D, данное приложение позволяет рассматривать динамику грозовой деятельности в заданном интервале времени.

Вкладка «Кластеризация 1» позволяет реализовать первую ступень предложенного кластерного анализа – метод минимального локального расстояния. В данной вкладке предложены формы для самостоятельного ввода значений минимального локального расстояния и минимального количества кластеров при разбиении. Кластеризацию методом минимального локального расстояния, возможно, осуществить при использовании трех видов метрик: евклидовой меры, расстояния Махаланобиса и нормированной евклидовой меры,

с возможностью задания нормировочных коэффициентов для координат и времени. После отданной команды «Кластеризовать» во вкладке «Кластеризация 1», слева отображается информация о полученном количестве кластеров, а также таблица, содержащая более детальную информацию о каждом из полученных кластеров. В нижней части окна главной формы отображаются результаты первого шага кластеризации в 2D и 3D (рисунок 3.4).

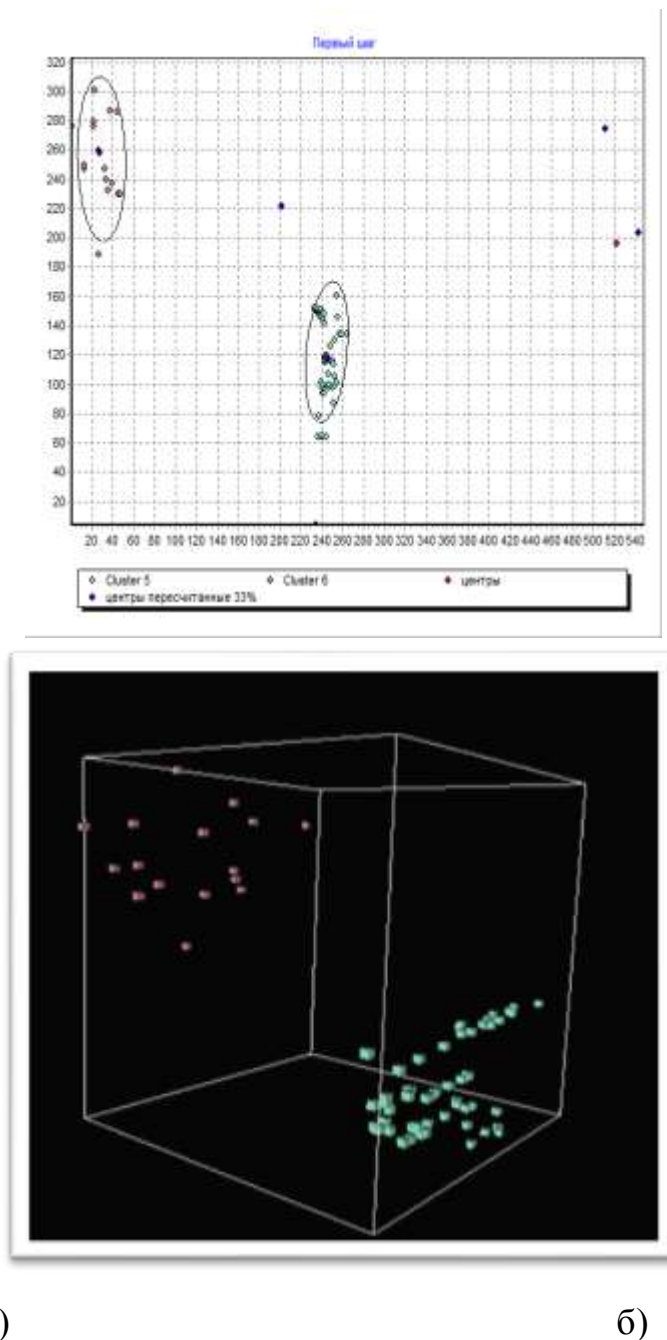


Рисунок 3.4. Визуализация результатов кластеризации методом минимального локального расстояния: а). в режиме 2D; б). в режиме 3D

Вкладка «Кластеризация 2» позволяет реализовать методы модального анализа, задавая различные углы поворота координатных осей (рисунок 3.5).

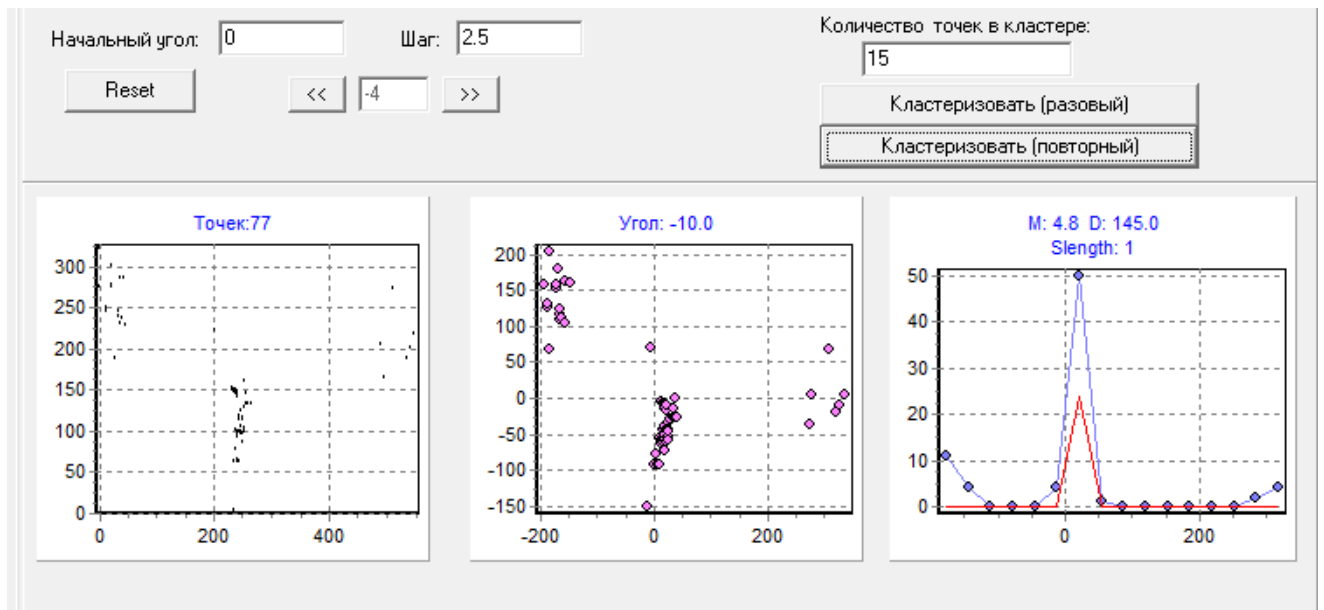


Рисунок 3.5 – Пример работы программы методами модального анализа

Вкладка «Дерево данных» позволяет сохранять данные, характеризующие отдельный грозовой очаг в отдельный файл, строит иерархию кластеров.

3.4 Пространственно-временные характеристики грозовой активности

Инструментальные методы уже неоднократно успешно применялись при исследовании грозовой активности Дальнего Востока и Восточной Сибири [126, 127, 128, 129]. В работе [36] было установлено, что на Востоке России имеется два района повышенной плотности грозовых разрядов с координатами 44° - 62° с. ш.: Западносибирская равнина (60° - 88° в. д.) и районы Большого и Малого Хингана (114° - 140° в. д.).

Грозовая активность региона Якутии была подвергнута более детальному анализу [95, 128]. В данном регионе выделяются три района с наиболее повышенной грозовой активностью: Алданское нагорье (Нерюнгри), Приленское плато (Мирный) и Якутск с его окрестностями. В связи с этим для получения

данных нами были установлены однопунктовые грозорегистраторы в Якутске, Нерюнгри и Мирном (радиус регистрации каждого 300 км). В выборку для исследования параметров грозового очага вошли данные, полученные однопунктовыми грозопеленгаторами за 2009 г.

Первый район с повышенной грозовой активностью – это юго-восточная горная часть Якутии, Алданское нагорье. Здесь отмечается 7-10 дней с грозой в год [130, 131]. Алданское нагорье – высокоприподнятая плоскогорная поверхность, над которой расположены короткие горные хребты. Нагорье расчленено широкими долинами рек [131].

Ко второму району, с меньшей повторяемостью гроз, относится средняя часть долины реки Лена, находящаяся на Приленском плато, с 5-8 днями с грозой в год [130, 131]. Приленское плато является возвышенной равниной и простирается в основном вдоль реки Лена, вытягиваясь в широтном направлении. Коренные берега Лены при этом образуют высокие скалистые обрывы.

Город Якутск и его окрестности, являясь источником дополнительного тепла, также образуют зону повышенной плотности грозовых разрядов. В [3] отмечается, что на данной территории наблюдается в среднем 12 дней с грозой в год.

Зоны грозовой активности в Якутии обусловлены во многом ее физико-географическим положением. Опираясь на классификацию гроз по условиям их возникновения, можно предположить, что территориям Приленского плато и города Якутска присущи внутримассовые грозы, а грозы, возникающие на Алданском нагорье, как правило, обусловлены наличием больших перепадов высот.

Фактором возникновения усиленной грозовой деятельности в южном и западном регионах Якутии может являться перенос воздушных масс, сталкивающийся с многообразием природного ландшафта [126, 127]. В юго-восточной части Якутии преобладают высокогорные ландшафты с вариацией высот от 640 м до 2410 м над уровнем моря. Верхоянский горный хребет, Алдано-Учурский хребет и совокупность горных хребтов в юго-восточной части Якутии,

окольцовывающие Токинское плато, ограничивают перенос воздушных масс. Таким образом, повышенная грозовая активность трех перечисленных зон обуславливается особенностями рельефа.

Многопунктовая регистрация представлена данными многопунктовой системы регистрации World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [132]. Один из приемных пунктов этой научной сети для регистрации молниевых разрядов расположен в г. Якутске. Каждый из приемных пунктов посылает на центральный обрабатывающий компьютер точное время возникновения атмосферика. С помощью этой информации со всех станций определяется месторасположение и количество грозовых разрядов с точностью до нескольких километров во временном интервале десять минут. Система WWLLN полностью покрывает территорию исследуемого региона. В выборку для исследования характеристик грозовых объектов вошли данные сети WWLLN за 2011 гг.

Плотность грозовых разрядов на территории Якутии за период с 2009 по 2011 гг. по данным системы WWLLN распределилась следующим образом: максимальное значение плотности разрядов молний в землю на единицу площади наблюдалось на юго-востоке территории, в районе Алданского нагорья; минимальное значение плотности разрядов наблюдалось в центральном регионе Якутии, в районе г. Якутска [95]. На рисунке 3.6 показана карта плотности грозовых разрядов, построенная для Дальнего Востока и Восточной Сибири за 2009-2011 гг. по данным многопунктовой системы WWLLN. Нерюнгри имеет координаты $56^{\circ}39'$ с. ш. и $124^{\circ}43'$ в. д., Якутск – $62^{\circ}01'$ с. ш. и $129^{\circ}43'$ в. д. и координаты Мирного $67^{\circ}32'$ с. ш. и $113^{\circ}57'$ в. д.

При анализе карт плотности грозовых разрядов видно, что самые высокие значения плотности разрядов молнии были зарегистрированы в юго-восточной Якутии, максимальные в окрестностях Нерюнгри. В горных районах количество атмосферных осадков и вместе с ними и плотность грозовых разрядов зависят в основном от высоты. Самое большое количество атмосферных осадков обнаруживается при умеренно восходящих потоках воздуха во впадинах между

горными хребтами, где рельеф и, следовательно, восходящее движение наиболее интенсивно, по сравнению с более низменными районами.

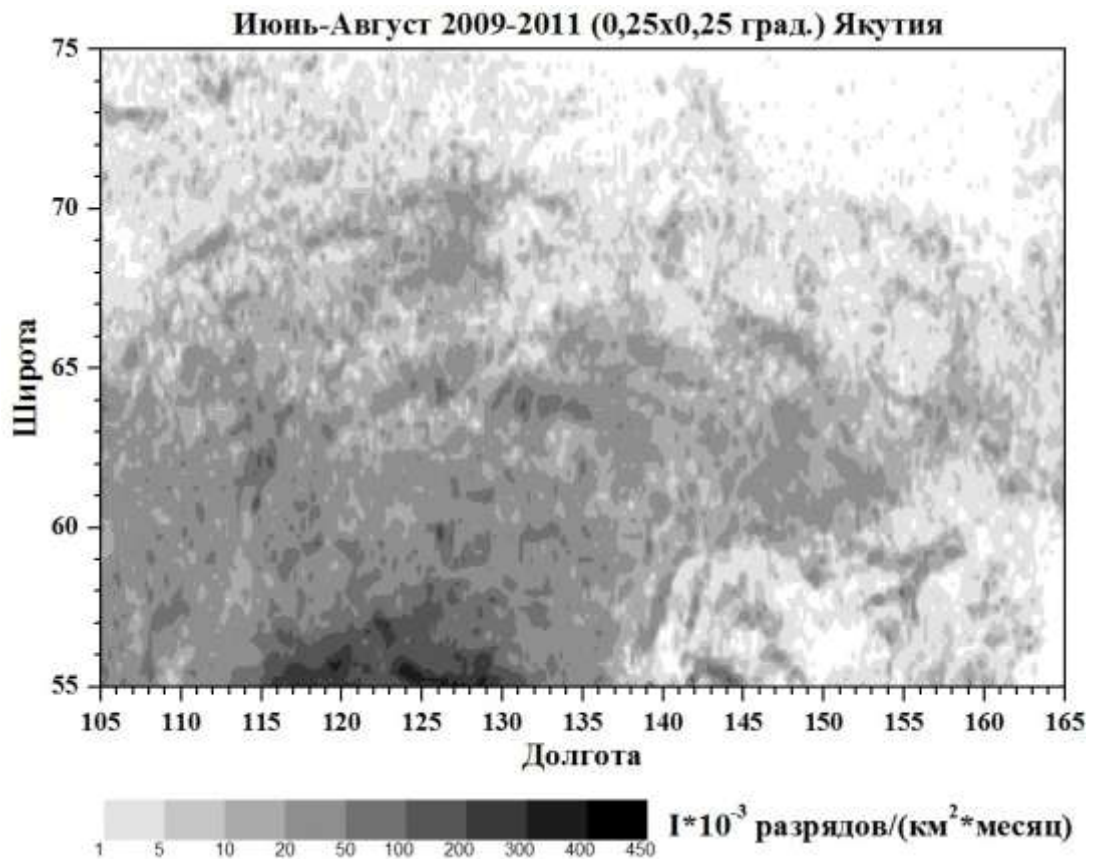


Рисунок 3.6 – Карта плотности грозовых разрядов для Якутии за 2009-2011 гг. по данным системы WWLLN

Торможение воздушных масс об предгорья Верхоянского хребта, высотная зональность, а также эффект межгорных понижений между хребтами Сетте-Дабан и Сунтар-Хаята, Кюэлляхский и Усть-Виллюйский влияют на картину распределения плотности грозовых разрядов, что отмечено в исследованиях [3].

3.5 Параметры пространственно-временных характеристик грозового очага

Метод двухступенчатой кластеризации грозовых разрядов был применен к ежедневным, в пределах грозового сезона, данным о грозовых разрядах. Эти данные получены по результатам регистрации с помощью двух методов:

однопунктового и многопунктового. В данном разделе выборку представляют данные однопунктовых грозорегистраторов, установленных в трех зонах, за август 2009 г, а также данные за сезон 2011 г по наблюдениям многопунктовой системы WWLLN.

По наблюдениям регистрации количества атмосфериков, суточный ход в летние месяцы имеет вид двухпиковой кривой с первым максимумом в 7 – 9 ч мирового времени, что соответствует 16 – 18 ч местного времени. Этот максимум определяется максимумом местной грозовой активности. Второй максимум наблюдается в 17 часов мирового времени, что соответствует 2 ч ночи местного времени. Этот максимум определяется наилучшими условиями распространения радиоволн очень низкочастотного диапазона в ночное время.

Сезонная вариация числа радиоимпульсов грозовых разрядов имеет характерный вид одной полуволны с максимумом в три летних месяца [38, 133].

Количество регистрируемых разрядов в час на площади зоны радиусом 300 км вокруг Якутска за анализируемый период в среднем меняется от 9 в утренние часы (11-12 ч) до 75 разрядов в час вечером (20-21 ч). Вокруг Нерюнгри – от 3 в ночные часы (23-24 ч) до 100 разрядов в дневные (15-16 ч). Вокруг Мирного – от 3 в утренние часы (10-11 ч) до 93 разрядов в час вечером (17-18 ч). Также в августе наблюдается локальный максимум в ночные часы (особенно выраженный вокруг г. Якутска (до 70 разрядов) с 0-1 ч. Ночной подъем в августе может быть объяснен воздушными (поднимающимися) потоками – «термиками» над многочисленными, прогревающимися в дневное время озерами. Озера расположены в основном в низменных местах, что особенно характерно для зоны вокруг г. Якутска и не характерно для Алданского нагорья – зона вокруг г. Нерюнгри, где ночной максимум не выражен, а дневной сдвинут с вечерних на послеполуденные часы. Суточный ход, регистрируемый в зоне вокруг г. Мирного имеет единственный ярко выраженный максимум в 17-18 ч местного времени, характерный в среднем для всей Якутии по многолетним наблюдениям [3].

Рассматривая сезонный ход для гроз, регистрируемых в зоне вокруг г. Мирный, можно отметить, что наибольшее количество регистрируемых разрядов

приходится на июнь. Если рассматривать количество выделенных грозовых областей (очагов), то максимум наблюдаемых грозовых очагов в день в зоне действия пеленгатора (11 очагов) приходится на середину июля. Количество выделяемых очагов в день, в целом за сезон, изменяется от 1 до 11. В среднем за сезон количество выделяемых очагов в день 3 – 4 [128].

Количество грозовых очагов в сутки на площади радиусом 300 км вокруг пунктов наблюдения за сезон 2009 года по данным однопунктовых регистраторов показан в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения статистических показателей количества грозовых очагов за сезон 2009 г

Значения статистических показателей	Пункт регистрации в г. Якутске	Пункт регистрации в г. Мирном	Пункт регистрации в г. Нерюнгри
Среднее значение регистрируемых очагов	4	4	5
Мода	5	5	7
Интервал изменения количества грозовых очагов	[2; 7]	[2; 6]	[3; 9]

Предложенный метод выделения грозового очага позволил установить его структуру [128].

Анализ данных однопунктового грозопеленгатора в зоне 300 км вокруг г. Мирного за сезон 2009 г. показал, что грозовые очаги, имеющие одначейковую структуру составляют 52% от всех наблюдаемых за сезон, двухячейковую – 25%, трехячейковую – 9%, а грозовые очаги с числом ячеек от 4 до 7 составляют 14% от наблюдаемых, что аппроксимируется зависимостью:

$$N = 52,414 \cdot n^{-1,855}, \text{ при } R^2 = 0,89$$

и показано на рисунке 3.7.

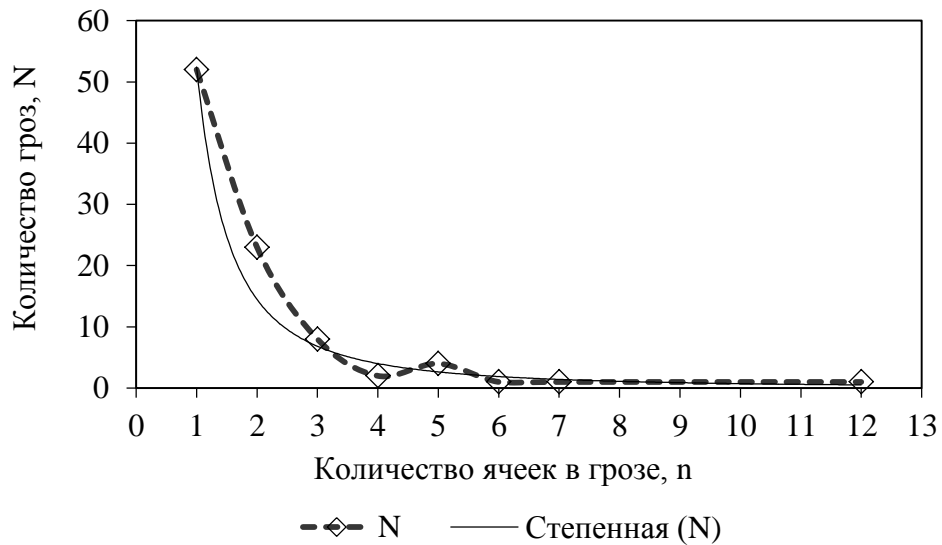


Рисунок 3.7 – Встречаемость гроз в зоне радиусом 300 км около г. Мирного за летний сезон 2009 г., N в зависимости от количества ячеек в грозе

Соотношение между площадью территории занятой грозой и площадью отдельного очага в этой грозе описывается зависимостью:

$$S_o = 4252,6 \cdot e^{0,15t} \text{ при } R^2 = 0,8,$$

то есть с увеличением площади грозовых очагов увеличивается и площадь общей территории, занимаемой грозой в рассматриваемые сутки. Эта зависимость представлена на рисунке 3.8.

Медианное значение относительной площади занимаемой грозой за сутки в процентах от площади зоны регистрации однопунктовых грозопеленгаторов, 26,2% при минимальном зарегистрированном значении 2,8%, а максимальном 96%. До 50% выделенных с помощью кластеризации гроз занимают площадь от 15,5% до 55,6% от площади зоны регистрации. Это говорит о существенном покрытии территории центральной Якутии грозовой деятельностью во время летнего сезона.

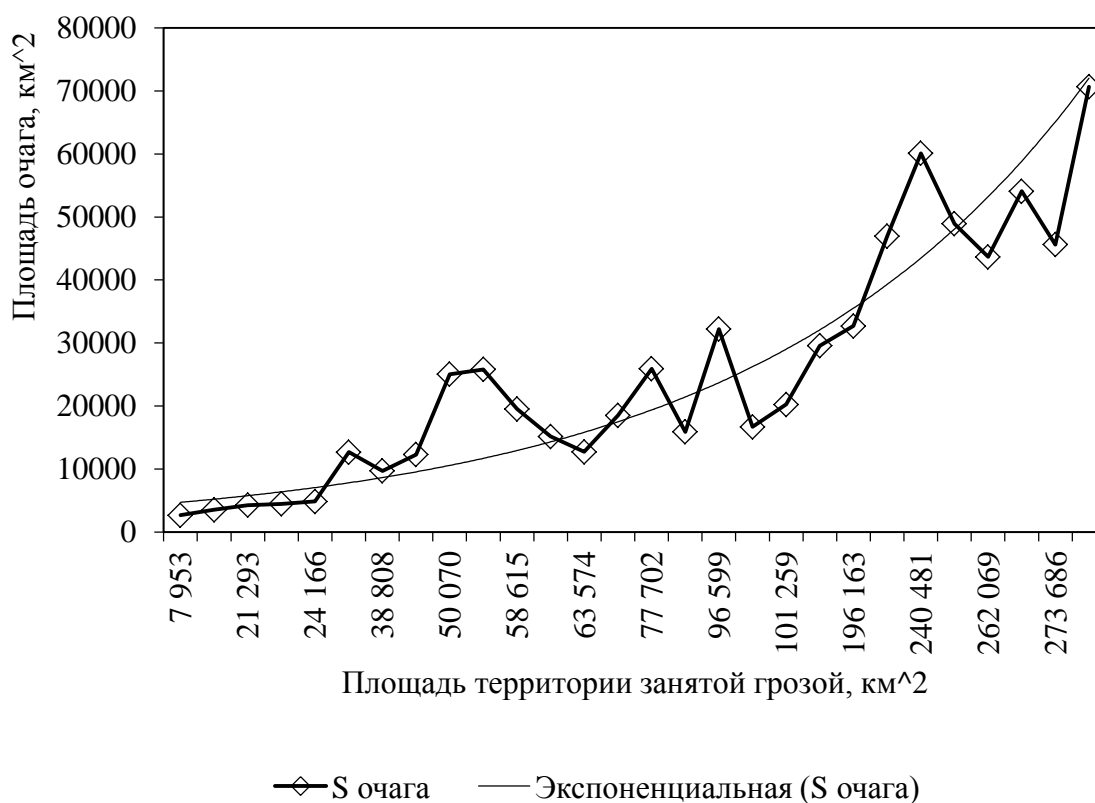


Рисунок 3.8 – Зависимость площади очага от площади территории занятой грозой по усредненным данным трех пунктов регистрации за август 2009 г.

Анализируя встречаемость гроз в зависимости от плотности разрядов внутри грозы, на рисунке 3.9 видно, что в среднем плотность разрядов внутри грозы изменяется от $0,0005 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$ до $0,23 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$. Наиболее часто встречаются грозы с малой плотностью разрядов. Около 90% рассмотренных гроз имеют значение плотности в среднем $0,0025 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$ с максимальным значением до $0,005 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$.

Среднее значение плотности грозовых очагов вокруг Нерюнгри $0,004 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$.
Среднее значение плотности грозовых очагов вокруг Мирного $0,003 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$.
Среднее значение плотности грозовых очагов вокруг Якутска $0,002 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$
(рисунок 3.9).

Флуктуации год от года достаточно велики: среднее значение плотности грозовых очагов внутри зон регистрации вокруг Якутска в 2009 г. – $0,11 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$, в 2010 г. – $0,1 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$, в 2011 г. – $0,3 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$.

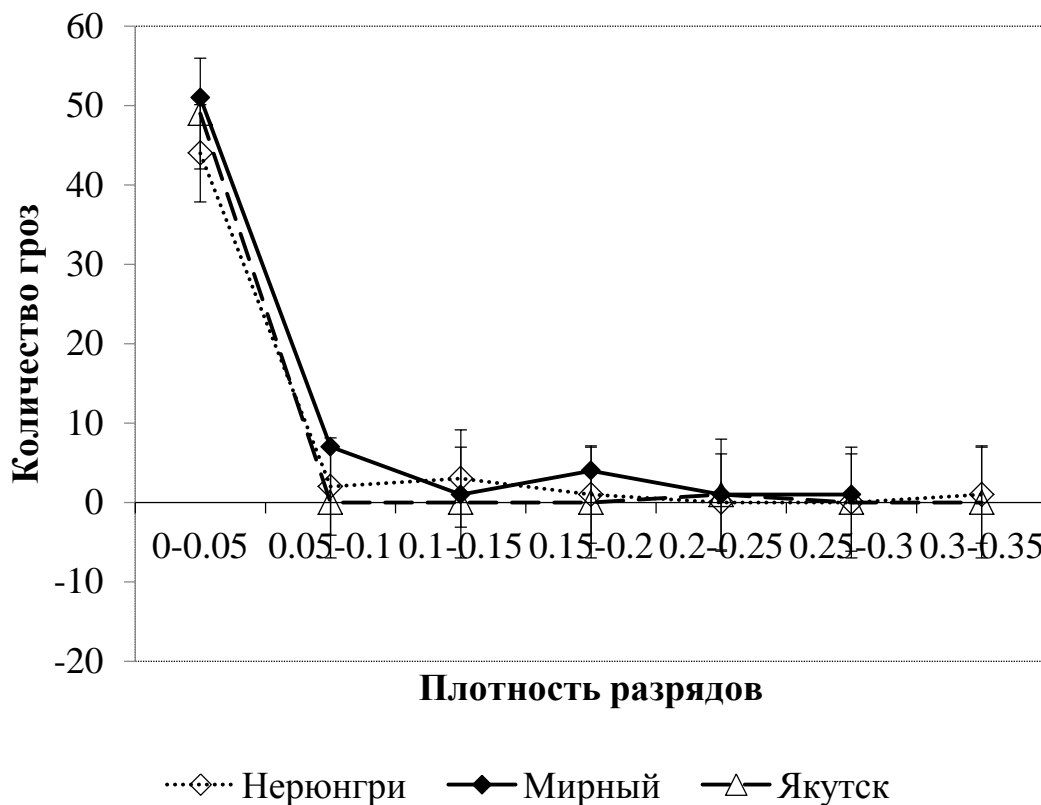


Рисунок 3.9 – Встречаемость гроз по плотности разрядов внутри очага

Если рассматривать среднюю плотность разрядов по всему региону, то распределение процента гроз N по значению плотности I может быть описано убывающей степенной функцией:

$$N = 67,62 \cdot I^{-2,65} \text{ при } R^2 = 0,8.$$

Средняя плотность потока разрядов по регистрируемой площади трех грозопеленгаторов $0,15 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$. По данным [134] плотность грозовых разрядов над территорией Томской области составляет $1,4-4,2 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$, что значительно

превосходит полученные нами значения для центральной и южной Якутии. Это отличие обусловлено тем, что в применяемом нами программном обеспечении для однопунктовых пеленгаторов выделялись только наземные разряды, в то время как счетчики, применяемые в г. Томск регистрируют все атмосферники, превосходящие заданный порог. Отметим также, что эффективность системы WWLLN, из-за большого расстояния между пунктами, составляет только около 15%. Данные об эффективности регистрации грозовых разрядов этой сетью приведены в работе [135].

Исследование распределения плотности грозовых разрядов в зависимости от площади грозового очага по объединенным данным для 300-километровых зон вокруг Якутска, Мирного и Нерюнгри показало, что с увеличением площади очагов плотность разрядов также падает и эту зависимость можно записать с помощью экспоненциальной функции (рисунок 3.10), аналогично [3] как

$$I = 0,0091 \cdot e^{-0,03S} \text{ при } R^2 = 0,75.$$

Падение плотности разрядов с увеличением площади очага, вероятно, объясняется тем, что при увеличении площади грозового очага увеличивается соответственно и количество ячеек очага, которые распределены в грозовом очаге с промежутками, то есть увеличивается «рыхлость» распределения грозовых разрядов.

Таким образом, увеличение количества разрядов в зоне регистрации влечет не увеличение плотности внутри грозовых очагов, а увеличение площади охваченной грозой. И средние значения плотности разрядов внутри грозового очага зависят только лишь от размеров самого очага.

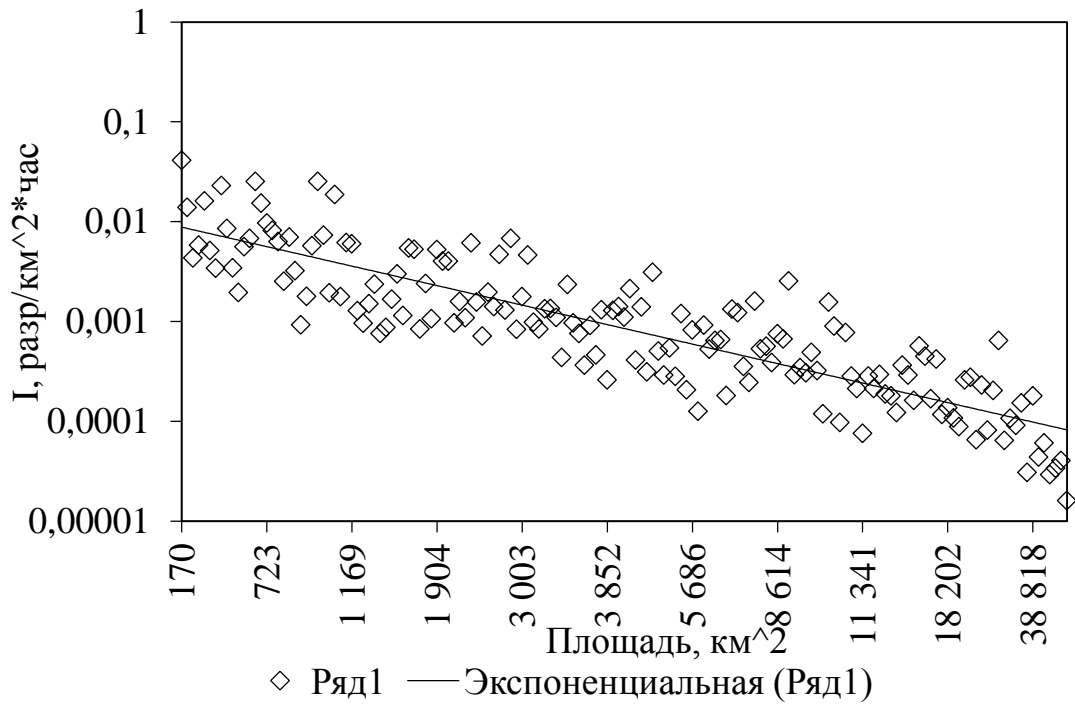


Рисунок 3.10 – Зависимость плотности разрядов грозового очага от его площади по усредненным данным сезона 2009 г.

Для установления значений пространственно-временных параметров распределения плотности грозовых разрядов в грозовых очагах были отобраны 30 длительно существующих изолированных грозовых областей. Всего отобрано и проанализировано детально за август 2009 г по 10 грозовых областей в каждой зоне наблюдения с длительностью существования более 3 ч. Анализ этих 30 изолированных грозовых очагов показал, что их длительность меняется от 2 до 17 часов.

При анализе 18 очагов, длительностью более 8 часов, получено, что количество грозовых ячеек в среднем меняется от 2 в начале и конце существования очага до 5 в средней части времени его жизни – максимуме развития грозового очага. Площадь такой длительной грозы меняется от 2000 км² в начале и конце существования очага до 34800 км² в стадии максимума - средней части времени его жизни.

Средняя площадь грозы для Средиземноморья 3500 км² по данным работы для 2008 г [82].

Отдельная гроза может состоять как из одной ячейки, так и из их комплекса.

Длительность 80% всех регистрируемых гроз составляет около двух часов и менее. По результатам проведенного анализа продолжительность грозовых очагов в Якутии колеблется от 1 часа до 1,5 суток. При этом в Евразии среднегодовая продолжительность одной грозы изменяется от 1,2 часа до 2,5 часов, что показано в исследованиях [136].

По данным карты продолжительности отдельных гроз в радиусе наблюдения метеорологических станций (около 10 км), приведенной в работе [137] следует, что юго-восточная часть Среднесибирского плато (западная половина междуречья Лены, Вилюя и Нижней Тунгуски), бассейн реки Олекмы и горы южнее ее верховьев отличаются большей продолжительностью грозы (2-3 ч), чем остальная часть Якутии (1-2 ч). Действительно, самые продолжительные грозы, исходя из анализа данных в августе, происходят чаще всего вокруг Нерюнгри. Вокруг Якутска, напротив, чаще всего происходят короткие грозы. Однако, по данным наблюдений в Восточной Сибири для отдельных гроз с помощью счетчиков грозовых разрядов в работе [41] следует, что внутримассовые грозы длятся в среднем 4 ч, а фронтальные – 9 ч, то есть значительно дольше. Продолжительность наблюдаемых нами гроз соответствует в основном фронтальным грозам. Таким образом, основной массив гроз в рассматриваемых нами районах вызван атмосферными фронтами.

Также как и в [2], длительность гроз была разделена на 3 стадии: первая (начальная), стадия зрелости и стадия распада. В работе [138] по времени длительности мощного кучевого облака, в котором может быть зарегистрировано до 50 разрядов в минуту, приводятся следующие данные: полный цикл жизни такого облака длится в среднем до 5 часов. Первая стадия характеризуется продолжительностью до 2 часов, стадия зрелости может длиться до 4-х часов, а прекращение грозовой активности в последней стадии грозы происходит в течение около 1 часа. На рисунках 3.11 и 3.12 начальной стадии соответствует интервал (-5; -2), средняя (-2; 6), заключительная (6;8).

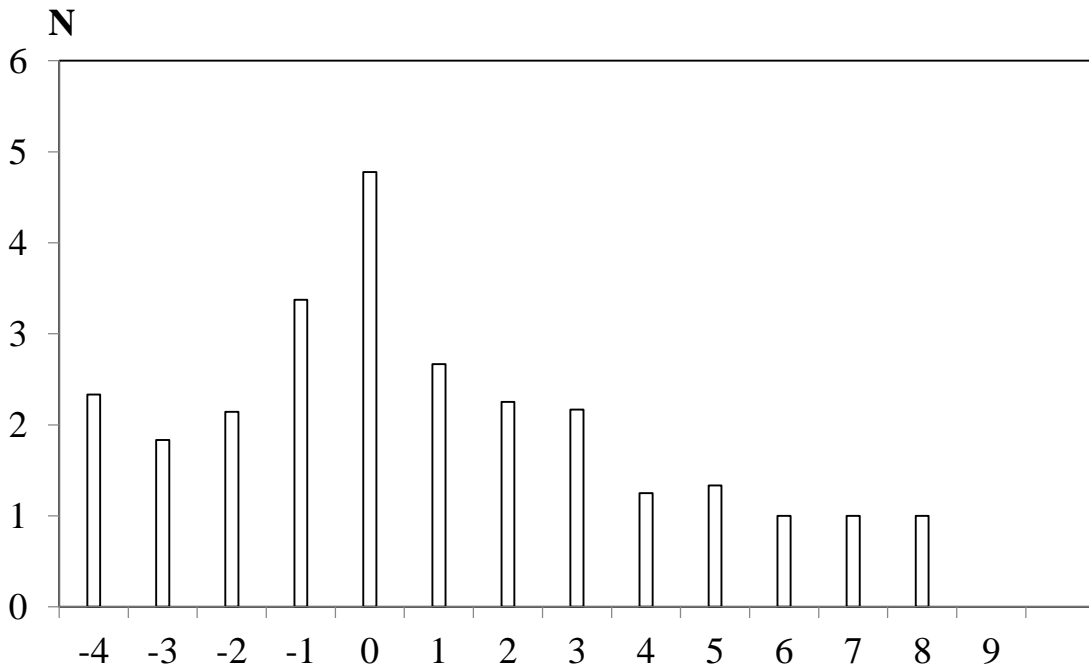


Рисунок 3.11 – Распределение числа ячеек грозового очага от стадий его существования по усредненным данным из трех пунктов наблюдения в августе 2009 г.

В зависимости от стадии жизни грозы, менялись площадь грозовых очагов и количество соответствующих ей областей наибольшего сосредоточения грозовых разрядов (грозовых ячеек), в среднем по всему региону, от 1 до 2 в начальной стадии, от 3 до 5 в средней и от 1 до 2 в заключительной (рисунок 3.11, 3.12).

За анализируемый период (август 2009 г) скорость движения центров плотности грозовых очагов характеризовалась средними значениями 45,4 км/ч, 66,2 км/ч, 74, 2 км/ч для Мирного, Якутска и Нерюнгри, соответственно. Мода распределения скорости движения грозовых очагов составляет 67 км/ч. Среднее значение скорости смещения центров активности очагов 50,4 км/ч. На рисунке 3.13 представлено распределение грозовых областей по скорости смещения их центров плотности. Однако перемещение центра плотности внутри часового отрезка происходит, как правило, беспорядочно и выражается смещением активности различных участков очага во времени, а не только изменением линейных параметров грозы в пространстве.

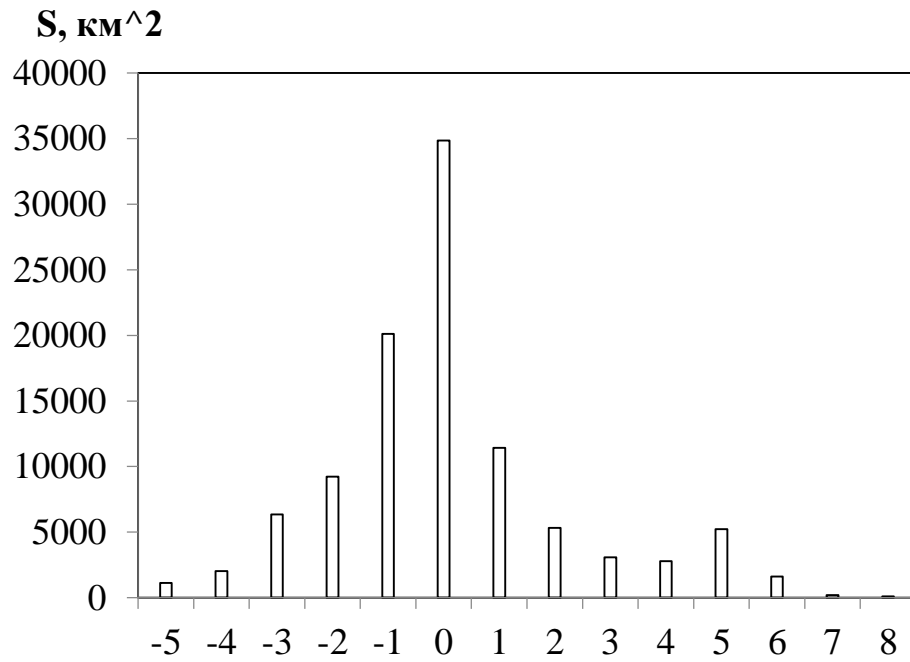


Рисунок 3.12 – Зависимость площади грозового очага от стадии его развития по усредненным данным 30 очагов длительностью до 14 часов

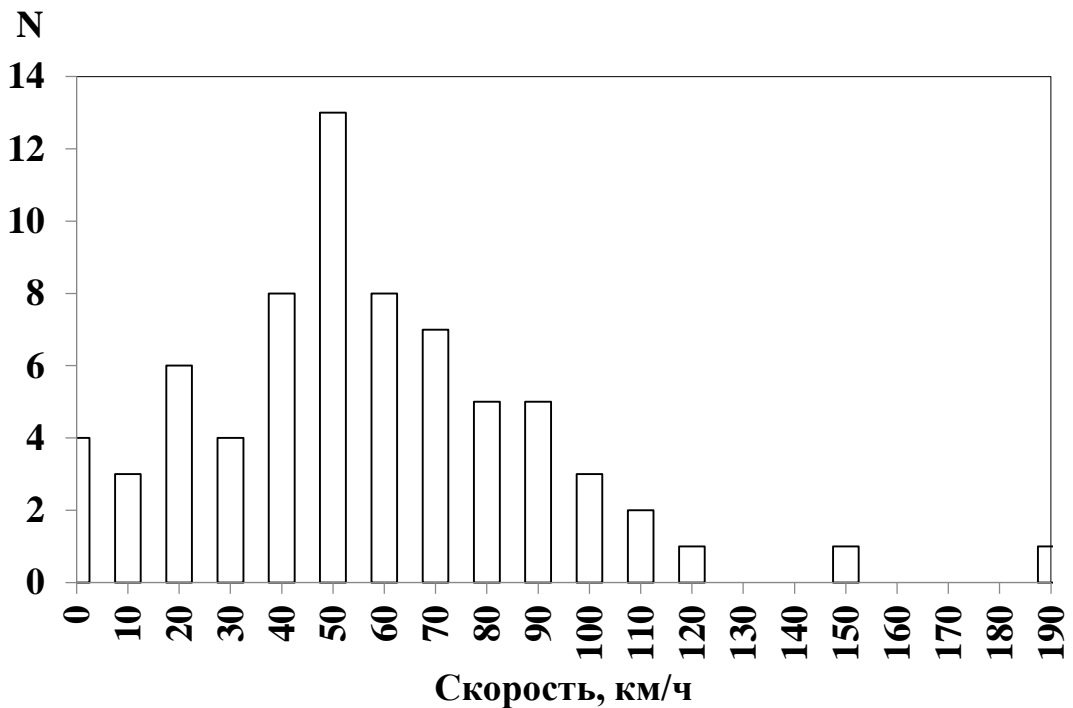


Рисунок 3.13 – Распределение грозовых областей по скорости смещения их центров плотности по данным августа 2006 г.

Аналогичные характеристики грозовых очагов получены в работе [128] по результатам обработки данных трех грозопеленгаторов, установленных в г. Якутск, г. Мирный и г. Нерюнгри за август 2006 г.

3.6 Параметры пространственно-временных характеристик грозовой ячейки

Для получения параметров одномодальных грозовых очагов выборку для реализации вычислительного эксперимента представляют натурные данные полученных одноячейковых гроз однопунктовыми грозопеленгаторами, установленными в зонах вокруг Мирного, Нерюнгри и Якутска за август 2006 г., и данные сети WWLLN за июнь 2011 г. Одноячейковые грозы по результатам исследования являются самыми часто встречаемыми в Якутии, при этом большая часть их сосредоточена в районах Центральной и Южной Якутии.

Неоднократные исследования характеристик грозовых очагов и ячеек радарными методами [139, 140, 141] на различных широтах позволяют провести достоверную экспертную оценку точности метода по определению параметров ячеек исследуемого региона. В работах [2, 74] предлагается находить площадь грозовой ячейки как площадь круга и принимать в качестве линии, оконтуривающей ячейку, окружность определенного радиуса. В [120] предложено за контур грозовой ячейки принять эллипс. Исследуя форму грозовых ячеек, нами было установлено, что на территории исследуемого региона контур грозовых ячеек может быть, как окружностью, так и эллипсом.

Для вытянутых эллипсоидных ячеек значения больших полуосей модельных эллипсов, полученные в результате обработки программой кластеризации массива данных, имеют средние размеры $19 \pm 0,5$ км, медианные значения размеров 18,5 км и моду 20,6 км, с минимальным значением 2 км, а максимальным – 50 км. Учитывая также малые значения эксцесса 0,8 и асимметричности 0,58 можно считать распределение нормальным и принимать размеры большой и малой полуосей модельного эллипса за основные

геометрические характеристики грозовой ячейки. Распределение для малых полуосей несимметрично и сдвинуто в сторону малых значений: средние значения размеров $9,7 \pm 0,5$ км, медианные значения 7,5 км и мода 2,6 км, с минимальным значением 1 км, а максимальным – 31 км, эксцессом – 0,4 и асимметричностью – 0,7.

Вытянутость ячеек определяется с помощью эксцентриситета. Ячейки, контур которых близок к окружности, характеризуются значениями эксцентриситета близкими к нулю (0,17 экспериментально). А вытянутые ячейки, ячейки, контур которых эллипс, – значениями близкими к 1 (0,9998 экспериментально), в тех случаях, когда эллипс практически вырождается в линию. По данным системы WWLLN была построена зависимость встречаемости грозовых ячеек от значения эксцентриситета. Из анализа данных следует, что для Якутии характерны одноячейковые грозы с контурами близкими к окружности, но основной вклад в максимальные значения эксцентриситетов вносят грозовые ячейки, зарегистрировавшиеся в зонах вокруг Нерюнгри. Это проиллюстрировано на рисунке 3.14.

Среднее значение величин эксцентриситета модельных эллипсов площадей этих ячеек, при рассмотрении ячеек с площадями более 13 км^2 по данным многопунктовой системы WWLLN составляет $0,817 \pm 0,019$, значение медианы – 0,891, моды – 0,96, эксцесса – 1,56, асимметричности – 1,45. Встречаемость ячеек с различным эксцентриситетом представлена зависимостью:

$$N = 0,49 \cdot e^{0,37e} \text{ при } R^2 = 0,9.$$

Одна из самых важных характеристик, используемых в практике, является мощность грозовой ячейки. Область, которая покрыта кластером с интенсивностью, приближающейся к 50 разрядам в минуту, является потенциально опасной [113].

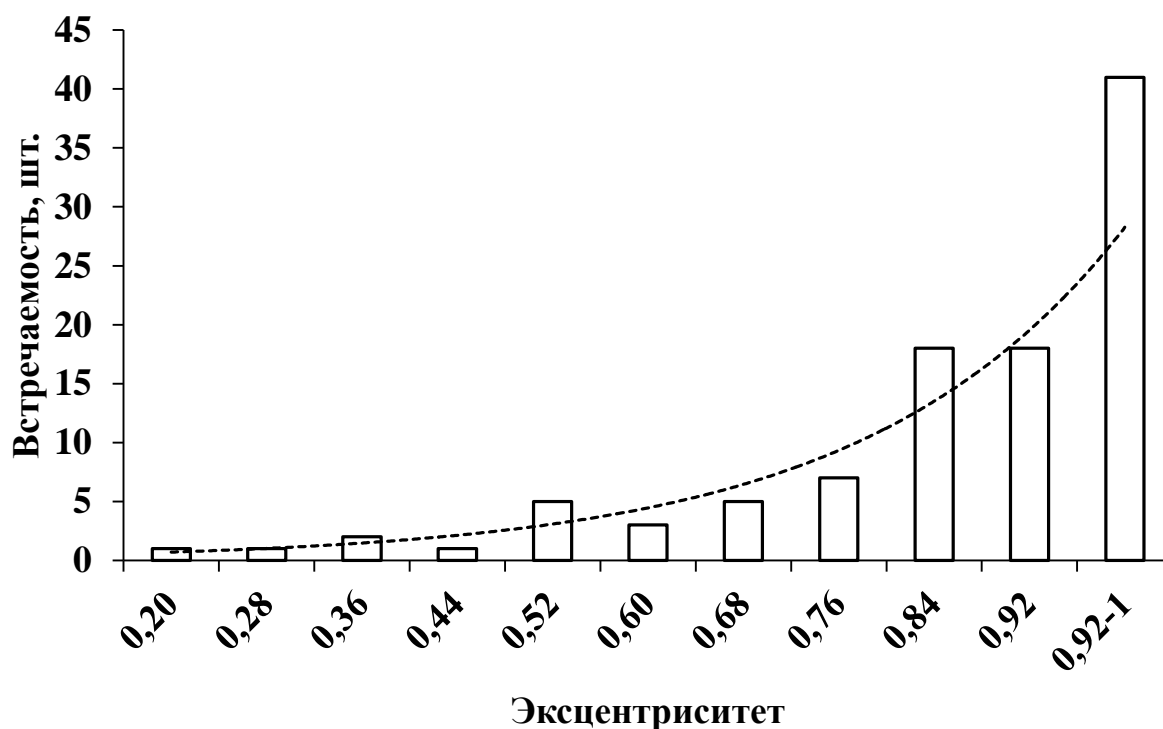


Рисунок 3.14 – Влияние значений эксцентриситетов на частоту их определения в зоне регистрации по данным многопунктовой системы WWLLN за июнь 2011г.

Результат вычислительного эксперимента по исследованию мощности грозовых ячеек показал, что 82% ячеек имеют интенсивность в пределах 0,0001-0,0004 $\frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{мин}}$, максимальная интенсивность по всей выборке 0,061 $\frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{мин}}$, а медианное значение 0,001 $\frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{мин}}$. Зависимость встречаемости ячеек от интенсивности разрядов внутри ячейки носит степенной характер и может быть выражена как:

$$N = 0,0007 \cdot I^{-2.181} \text{ при } R^2 = 0,86.$$

С увеличением площади ячеек интенсивность грозовых разрядов падает обратно пропорционально площади. Таким образом, это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что увеличение интенсивности грозовой ячейки происходит не за счет увеличения ее мощности, а за счет увеличения ее площади.

Из анализа данных получено, что с ростом значения эксцентриситета и, следовательно, повышением вытянутости ячеек увеличивается интенсивность грозовых разрядов в этих ячейках. Зависимость интенсивности ячеек от вида контура грозовой ячейки представлена на рисунке 3.15. Эта зависимость может быть представлена выражением:

$$I = 0,0002 \cdot \exp^{0.0212e} \text{ при } R^2 = 0,4.$$

Анализируя грозовые ячейки, выделенные в зонах регистрации вокруг Мирного, Нерюнгри и Якутска, самый быстрый рост функции интенсивности ячеек от эксцентриситета наблюдается в зоне регистрации вокруг Нерюнгри, а в Западной и Центральной Якутии эти функции растут одинаково.

Значения площадей модельных эллипсов 102 ячеек по данным многопунктовой системы без учета ячеек размером менее 12 км^2 , составляют в среднем $357 \pm 44 \text{ км}^2$, с медианой 210 км^2 , минимальным значением $12,5 \text{ км}^2$, максимальным значением 2959 км^2 , с эксцессом 12 и асимметричностью 2,9. Распределение по встречаемости площадей ячеек имеет экспоненциально-падающий вид:

$$N = 358.14 \cdot e^{-0.82S} \text{ при } R^2 = 0,93.$$

По данным однопунктовых грозорегистраторов было установлено, что самые меньшие по площади грозовые ячейки регистрируются в зоне вокруг Якутска со средним значением 191 км^2 (от 45 до 379 км^2), самые большие – в зоне вокруг Нерюнгри со средним значением 291 км^2 (от 96 до 443 км^2). По данным, приведенным в [14] размеры мощных грозовых ячеек, измеренные в Германии многопунктовой гронопеленгационной системой Lightning Position And Tracking System (LPATS), имеющих максимальные значения плотности разрядов молнии в землю ($6-7 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$) составляют около 700 км^2 .

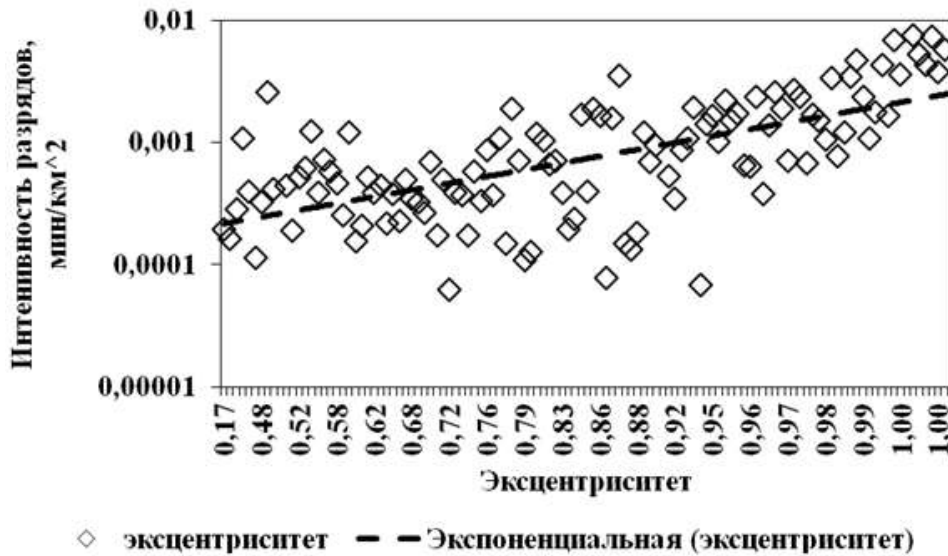


Рисунок 3.15 – Зависимость интенсивности ячеек от значений эксцентриситета по данным многопунктовой системы WWLLN за июнь 2001 г.

Проанализированные данные времени жизни 102 грозовых ячеек за июнь 2011 показали, что без учета ячеек с количеством разрядов менее 10 за время жизни и размером менее 12 км^2 , значения времени жизни составляет в среднем 31 ± 1 мин. Это время совпадает с медианным значением (31 мин) и модой (27 мин) с точностью до погрешности. Близкое к нулю значение эксцесса – 0,2 и асимметричности 0,3 позволяют считать распределение по времени жизни грозовых ячеек нормальным со значением $M=31$ мин и $\sigma=10$ мин, минимальным значением 10 мин и максимальным 57 мин. Гистограмма встречаемости времени жизни грозовых ячеек представлена на рисунке 3.16.

Проанализированные значения времени жизни 227 грозовых ячеек для данных, полученных с помощью однопунктовых пеленгаторов за 2006 г и 2009 г в радиусе 300 км вокруг гг. Якутск, Мирный и Нерюнгри показали, что среднее значение составляет 31 ± 1 мин, медианное значение – 30 мин и мода – 23 мин с минимальным значением – 7 мин и максимальным – 66 мин, что совпадает с полученными значениями по данным многопунктовой системы для 2011 г.

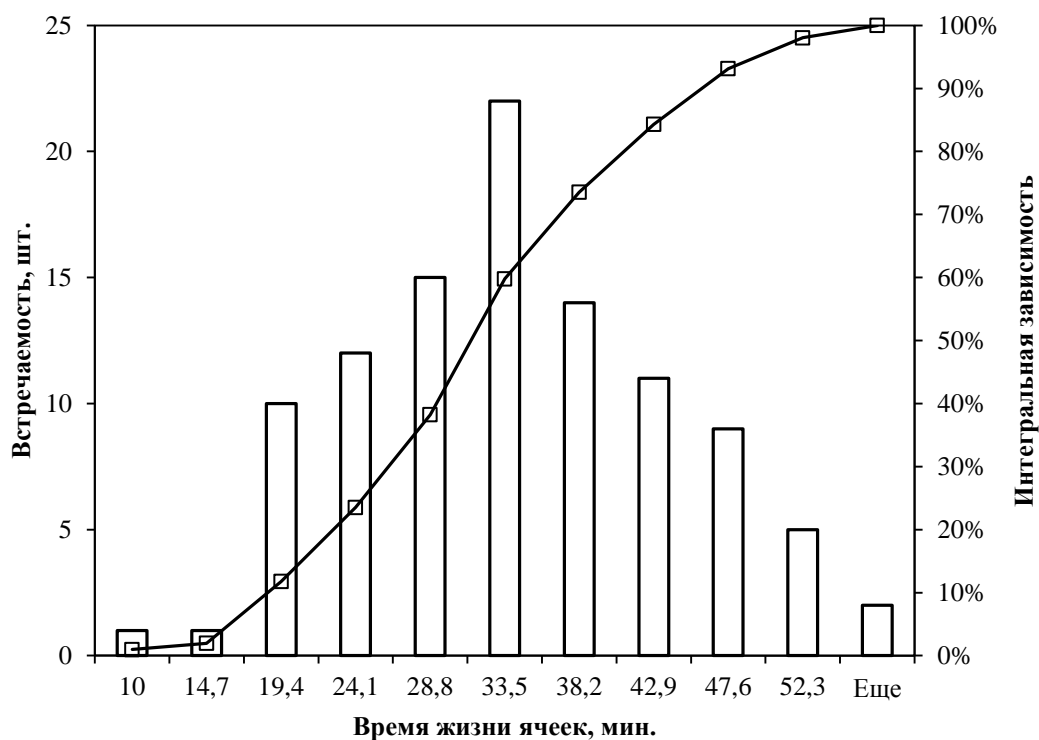


Рисунок 3.16 – Гистограмма встречаемости времени жизни грозовых ячеек по данным системы WWLLN за июнь 2011, в радиусе 1000 км вокруг г. Якутск

По данным радарных и гронопеленгационных измерений в Северной Америке [142] средняя продолжительность жизни грозовой ячейки составляет 23,6 мин, что немного меньше полученных нами для Якутии.

Для установления зависимости интенсивности разрядов в ячейке и площади ячейки от времени жизни были обработаны данные 63 ячеек длительностью от 30 до 60 минут, зарегистрированные однопунктовыми гронопеленгаторами, расположенными в зонах вокруг Мирного, Нерюнгри и Якутска и построенные с помощью программного комплекса кластеризации [95].

Из анализа данных, представленных на рисунке 3.17, следует, что для таких долго живущих ячеек стадия развития длится около 10 мин, стадия зрелости также длится около 10 мин для ячеек со временем жизни около 30 мин и около 20 мин для ячеек со временем жизни от 40 до 60 мин.

Остальное время длится стадия диссипации. Максимальная площадь и интенсивность достигается на стадии развития. Такие же выводы сделаны при анализе 72 ячеек также длительностью от 30 до 60 минут, выделенных при

помощи программы кластеризации грозовых разрядов по данным многопунктовой системы WWLLN [95]. Эта закономерность, только на других временных и пространственных масштабах, повторяет закономерность развития грозовых очагов, полученную ранее в [128].

Анализ измерений, проведенных в Испании [143] показал, что грозовой очаг, состоящий из одной ячейки, занимает площадь порядка 510 км^2 и длится 204 ± 192 мин.

В период увеличения грозовой активности средняя площадь, занимаемая очагом составляет 323 км^2 , длительность этой стадии 48 мин, при этом на этой стадии регистрируется около 3% разрядов. На стадии зрелости площадь – 631 км^2 , продолжительность – 108 ± 96 мин и на ней происходит 86% разрядов. Заключительная стадия характеризуется площадью грозы порядка 504 км^2 , длительностью, такой же как и длительность стадии увеличения грозовой активности, 48 мин и на ней регистрируется приблизительно 12% разрядов от общего количества за время существования одноячейковой грозы.

Таким образом, полученные значения площадей и времена жизни грозовых ячеек почти в два раза меньше соответствующих значений, наблюдаемых в Центральной Европе [144, 145].

Исследуя скорости движения ячеек в Якутии, нами было принято, что данные грозопеленгаторов показывают скорость смещения максимума интенсивности грозовой ячейки, а не скорость движения грозового облака. При этом медианные значения скорости движения ячейки, по данным однопунктовой и многопунктовой систем составили 56,4 км/час и 57,6 км/час соответственно. Более 50% значений скорости лежит в пределах от 40 км/час до 80 км/час.

По данным радарных и грозопеленгационных измерений в Северной Америке [142] средний размер в направлении движения составил 21,8 км, а средняя скорость движения была 59 км/ч, что соответствует нашим данным для Якутии.

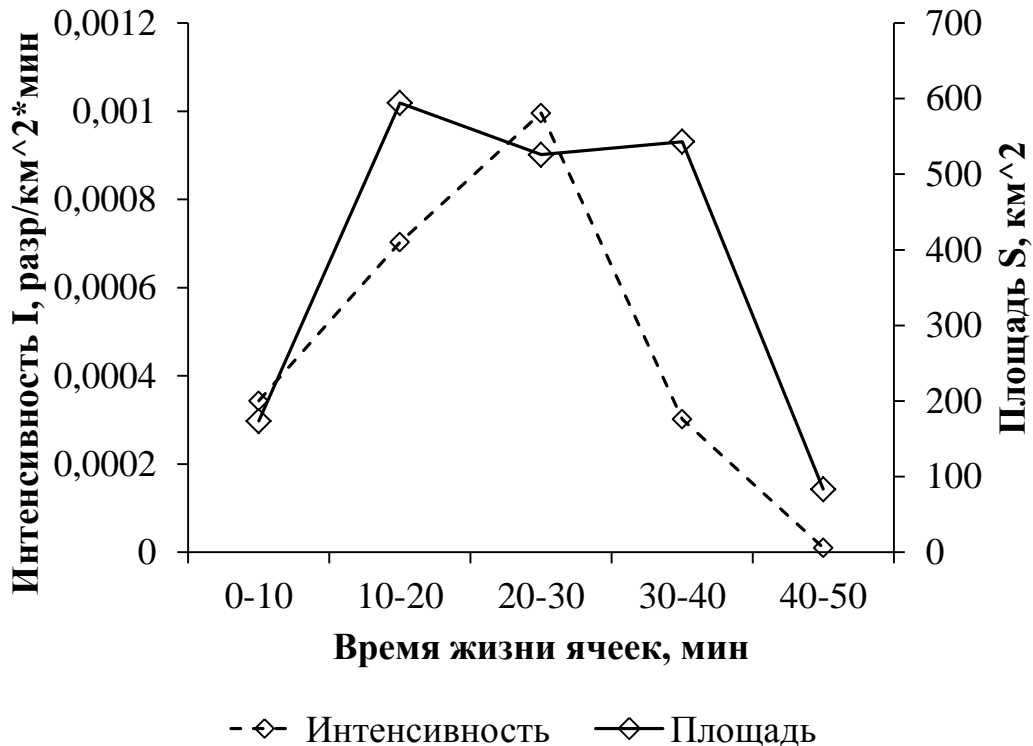


Рисунок 3.17 – Зависимости интенсивности разрядов в ячейке и площади ячейки от времени жизни

Анализируя грозовую активность Дальнего Востока при помощи разработанного метода построения кластерной модели грозовых объектов, получено критическое значение эксцентриситета эллипса, оконтуривающего грозовой объект. Рассмотрение формы ячеек в период действия внетропического шторма Lionrock (2016г) показало, что значение эксцентриситета эллипса порядка 0,8 характеризуется состоянием, когда ветер стабилизируется и достигает значения 153 км/ч и наблюдается у коротких по времени жизни ячеек грозового очага. В момент достижения этих параметров на территории Дальнего Востока выпало 184 мм за 12 часов. Дожди привели к чрезвычайной ситуации в Приморье: вышли из берегов реки, были размывы дороги, разрушены мосты и дамбы, затоплены дома и сельскохозяйственные угодья, разрушены ЛЭП. Предлагается, за критическое значение эксцентриситета принимать значение 0,6, что соответствует повышенной плотности грозовых разрядов внутри грозового объекта и в этом случае необходимо принимать защитные меры.

Выводы к главе

На основе разработанного метода комплексного мониторинга грозовой активности проведен анализ грозовой активности и определены пространственно-временные характеристики грозовой деятельности в Якутии. Построенные карты плотности грозовых разрядов на территории Якутии позволили с наибольшей точностью выявить области повышенной плотности грозовых разрядов. Показано, что с увеличением средней площади отдельного грозового очага площадь территории занятой этой грозой экспоненциально растет согласно закону $I = 0,0091 \cdot e^{-0,03S}$ при $R^2 = 0,75$. Флуктуации плотности грозовых очагов достаточно велики: от $0,1 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ до $0,3 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ и варьируются в зависимости от места возникновения. Средняя плотность потока разрядов по регистрируемой площади составляет $0,148 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$.

Для гроз, встречающихся на территории Якутии, установлено, что показателем мощности грозового очага может служить эксцентриситет модельного эллипса, огибающего грозовой объект. Более интенсивные очаги имеют более вытянутую форму. Начиная с определенного размера эксцентриситета, можно говорить о критических параметрах грозы, переводящих ее в особо опасное состояние. Таким образом, впервые установлено, что с увеличением эксцентриситета – вытянутости грозовой ячейки растет интенсивность грозы. Зависимость интенсивности ячеек от вида контура грозовой ячейки представлена выражением: $I = 0,0002 \cdot \exp^{0,0212e}$ при $R^2 = 0,4$. Если эксцентриситет выше приемлемого уровня 0,6, то это свидетельствует о повышенной плотности грозовых разрядов внутри грозового объекта и в этом случае необходимо принимать защитные меры.

4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В ИССЛЕДУЕМОМ РЕГИОНЕ

Для получения наиболее точной информации о грозовой активности исследуемой территории используется метод комплексного мониторинга грозовой активности. Схема метода комплексного мониторинга грозовой активности представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема метода комплексного мониторинга грозовой активности исследуемого региона

Этот метод основан на увеличении точности определения местоположения грозовых разрядов и грозовых объектов (очагов и ячеек) путем усовершенствования метода регистрации грозы и метода выделения грозовых объектов.

4.1 Требования к регистрирующей аппаратуре

Данные о местоположении грозового разряда фиксируются с помощью приемной аппаратуры для регистрации естественного ОНЧ-излучения, разработанной в ИКФИА СО РАН [146].

Как правило, ОНЧ-регистраторы имеют высокую чувствительность и широкий частотно-динамический диапазон (60 дБ по амплитуде в полосе 0,3 - 10,0 кГц), следовательно, базу регистрации целесообразно размещать на расстоянии не менее 30 км от поселений во избежание влияния промышленных шумов, искажающих принимаемый сигнал. Для «защиты» от местных шумов постановка антенного устройства и предварительного усилителя осуществляется на дистанции не менее чем 200 м от базы.

Для контроля, коррекции и повышения чистоты принимаемого сигнала регистрирующая аппаратура нуждается в техническом обслуживании, в том числе, рекомендовано производить калибровку регистрирующей аппаратуры несколько раз в год согласно плану и после технических сбоев.

Эквивалент антенны принимает сигналы калибровки (в диапазоне 0,5-10 мВ) с шумового ОНЧ-генератора.

Использование вертикального тонкого штыря в качестве косвенного эталонного метода оценка поля было обосновано Национальным бюро стандартов США на основании серии калибровочных экспериментов с применением рамочных вспомогательных излучателей, прецизионная калибровка которых по полю осуществлялась, в свою очередь, с помощью специально разработанной методики [147]. Многочисленные контрольные калибровки этим, достаточно трудоемким способом показали [147], что при соблюдении относительно

несложных условий размещения антенны и требований к ее заземлению и конструкции, калибровку приемного тракта можно осуществлять методом замещения антенны ее импедансным эквивалентом, что дает гарантию точности значения поля порядка 10%. Эти условия заключаются в следующем:

1) длина антенны должна быть больше двойного линейного размера заземленного проводящего полотна противовеса,

2) место размещение антенны должно быть геометрически ровным без посторонних предметов вблизи антенны на расстоянии не меньше двойного значения наибольшего размера предмета, если он больше антенны. Наилучшими считаются условия размещения антенны на удалении 6 размеров от высоких деревьев или других высоких предметов.

К сказанному можно добавить требования, вытекающие из практики измерений радиопомех. Секции штыря антенны и соединения с входом не должны иметь напаянных контактов. Все механические соединения, с другой стороны, должны дублироваться надежными электрическими паяными соединениями. Перед измерениями сопротивления необходимы обязательный контроль сопротивления утечки изолятора и надежное заземление противовеса.

Таким образом, при соблюдении перечисленных условий абсолютные взаимосвязанные значения набора пороговых уровней в единицах напряженности регистрируемой вертикальной составляющей электрического поля помех устанавливаются с точностью порядка 10-15%, не считая инструментальных погрешностей, обусловленной аппаратурными факторами. При этом величина поля рассчитывается из измеренных значений на выходе штыревой антенны поверенными приборами, а ее электрическая действующая высота равна половине геометрической высоты.

Значение напряженности магнитного поля (Н) определяется также косвенным методом, по известному (измеренному) калиброванному значению напряженности электрического поля (Е) в децибелах относительно 1мкВ/м из формулы (4.1):

$$E=\rho H, \quad (4.1)$$

где волновое сопротивление свободного пространства предполагается равным $\rho=120\pi=337$ Ом.

Возможна также калибровка рамки рамкой, удаленной на некоторое расстояние от калибруемой рамки для устранения взаимной индукции. Причем на вторую рамку подается известный сигнал от передатчика.

Для связи двух пунктов регистрации в единую многопунктовую систему следует находить разность времен появления радиосигнала в этих пунктах. Это возможно осуществить при помощи GPS-приемников, сравнительно дешевого и простого способа синхронизации радиосигналов. Так как часы внутри приемника GPS с высокой точностью $\Delta t=(\pm 50\div 100$ нс) синхронизированы с часами спутников, а шкала времени системы GPS соотнесена со шкалой всемирного координированного времени UTC, то GPS приемник можно рассматривать как источник высокоточной синхронизационной информации в любой точке Земли [148].

Выходными данными работы GPS-приемника являются стабильные синхронизированные гармонические радиосигналы 10 МГц, такие сигналы конвертируются аналогово-цифровым преобразователем с внешним тактовым генератором в совокупность тактовых импульсов частотой 2,5 МГц.

Пример структурной схемы однопунктового грозопеленгатора-дальномера с АЦП типа USB-3000 приведен на рисунке 4.2.

Для временной привязки к атмосферике можно использовать различные характерные точки. Привязка к максимуму или первому после начала нулевому переходу дает более значительную погрешность, чем привязка к первому нулевому переходу (единицы мкс).

Снижение радиоимпульса составляет 3 дБ/Мм способствует уверенной регистрации радиосигналов атмосфериков на расстояниях порядка 10000 км [148].

Благодаря этому, возможно охватывать территориально-удаленные базы, разнесенные на расстояния до нескольких тысяч километров, применяя различные методы дальнометрии и их композиции.

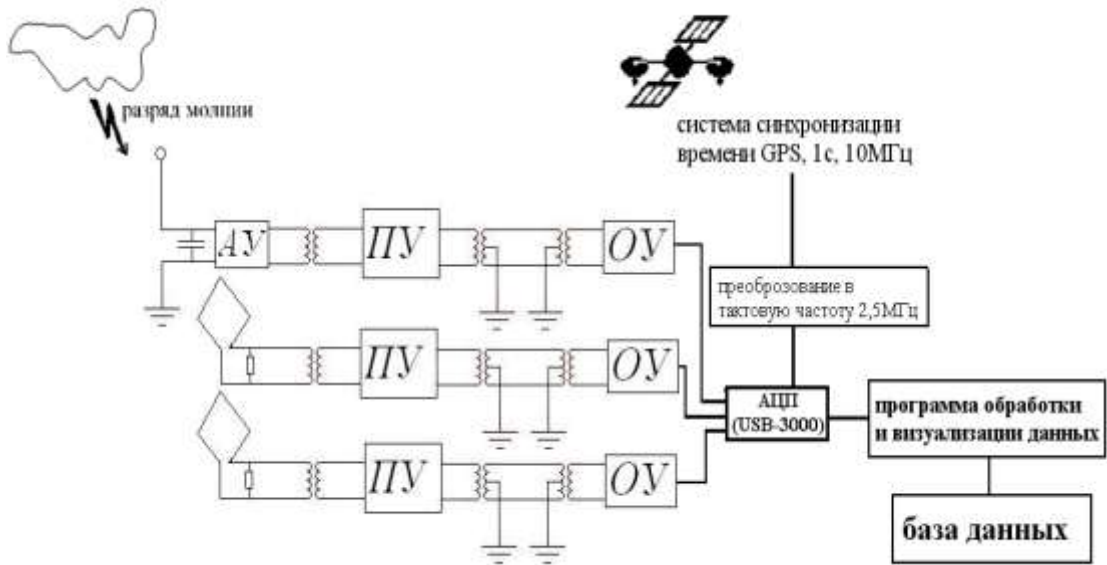


Рисунок 4.2 – Структурная схема грозопеленгатора-дальномера с АЦП типа USB-3000

При этом большие временные задержки, приводят к значительным ошибкам местоопределения. Например, на рисунке 4.3 приведены временные задержки погрешности гибридного метода на базе 643 км (Якутск – Нерюнгри). При $\alpha \approx 5^\circ$ и погрешности измерения времени 50 мкс ошибка равна 12° , а 100 мкс – 34° .

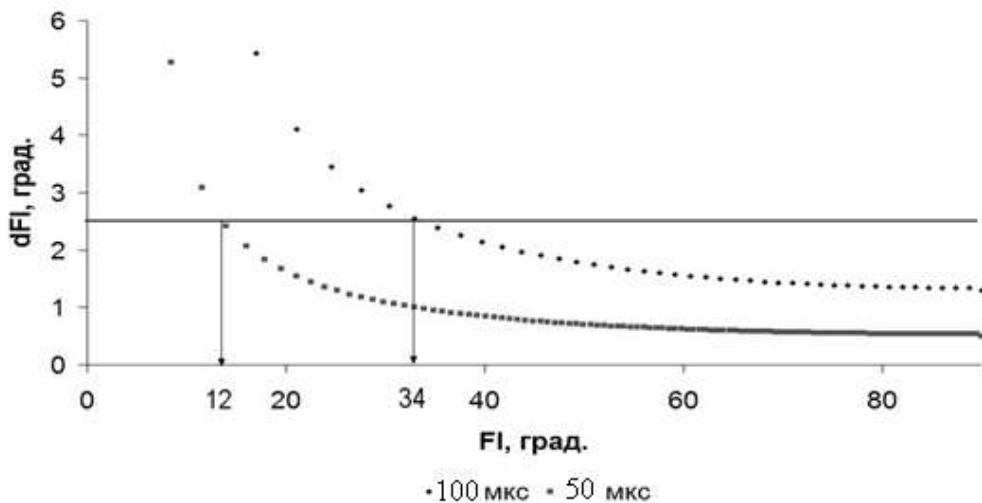


Рисунок 4.3 – Временные задержки погрешности гибридного метода на базе 643 км (Якутск – Нерюнгри)

4.2 Технология метода определения местоположения грозового разряда на основе данных двухпунктовой системы грозолокации для исследуемого региона

Метод оптимального определения местоположения грозового разряда подробно описан в пункте 2.3 данной работы. Практические рекомендации для оптимального определения местоположения грозового разряда могут быть сведены к выводу из этого пункта.

На основе исследования точности определения дальности, при оценке среднеквадратичных погрешностей однопунктового, триангуляционного и гибридного методов определения местоположения грозового разряда, установлено, что минимальная погрешность достигается в зависимости от значения угла прихода атмосферика. Таким образом, гибридный метод определения дальности применяется в том случае, если углы между направлениями прихода сигнала и линией, соединяющей две регистрирующие базы, меньше 80° . При величине углов в диапазоне от $80^{\circ} < \varphi < 132^{\circ}$ дальность вычисляется триангуляционным методом, а при углах до 180° применяется однопунктовая дальнометрия.

4.3 Технология метода обработки массива зарегистрированных грозовых разрядов

На втором этапе метода комплексного мониторинга грозовой активности повышается точность определения грозовых объектов за счет алгоритмов кластерного анализа, которые выделяют области повышенной плотности грозовых разрядов. Это позволяет определить плотность ударов нисходящих молний на единицу земной поверхности – важную и информативную характеристику для оценки возможного числа поражений техногенных объектов молнией [149]. Особенностью данного алгоритма является реализованный в программном комплексе модальный анализ, который позволяет соотносить

грозовой разряд к ячейке или очагу в случае перекрывающихся грозовых объектов. Схема метода кластеризации грозовых разрядов приведена на рисунке 4.4.

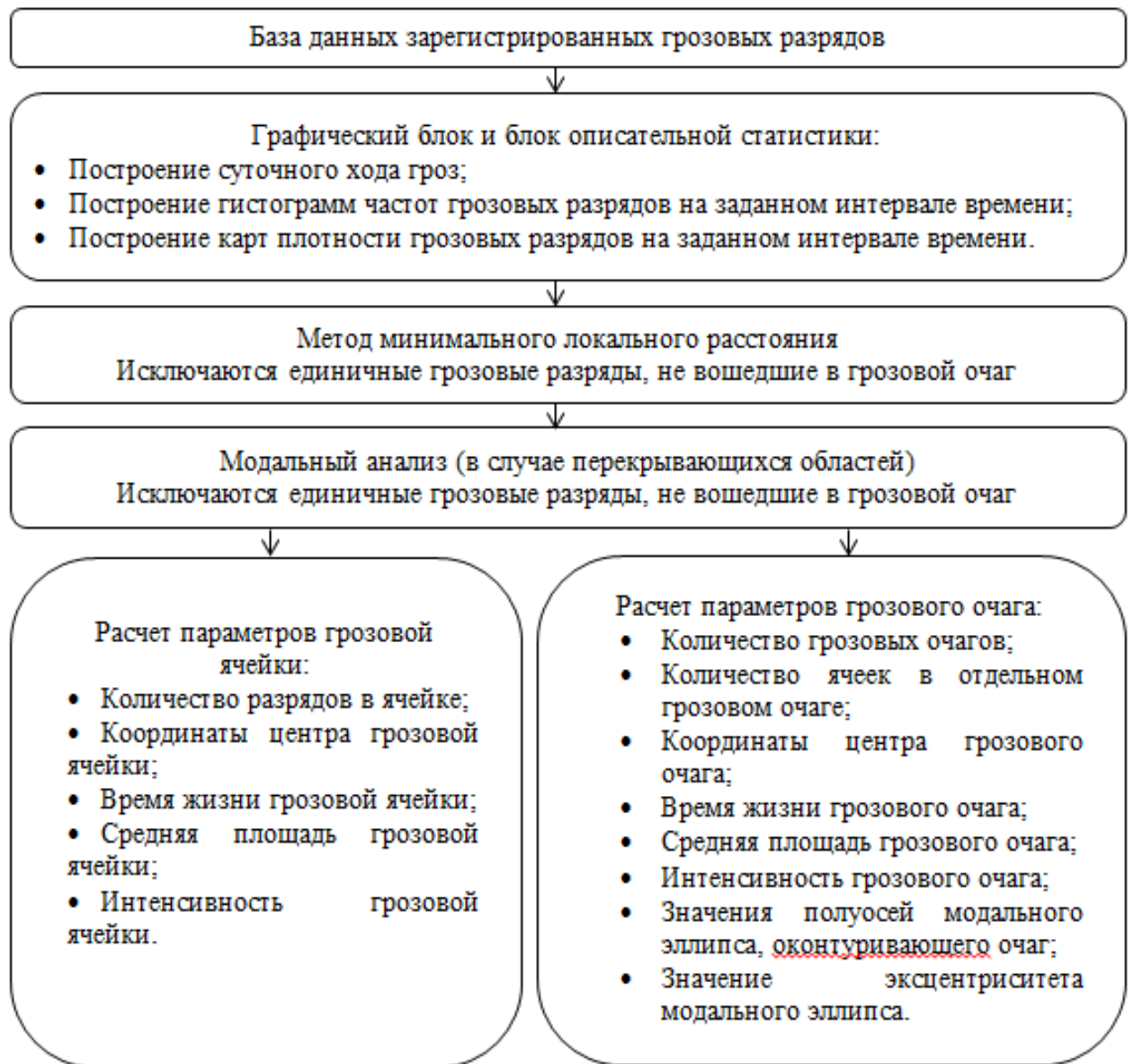


Рисунок 4.4 – Схема метода кластеризации грозовых разрядов

На основе обработанных данных создается информационная база данных пространственно-временных характеристик грозовой активности и осуществляется построение карт плотности грозовых разрядов исследуемой территории. Построение уточненных карт плотности грозовых разрядов

исследуемого региона осуществляется с целью увеличения безопасности техногенных объектов:

- при проектировании магистральных трубопроводов (для определения места прокладки), горно-обогатительных комбинатов и их инфраструктуры. Поскольку проектирование трубопроводов и горно-обогатительных комбинатов включает комплекс геологических, геодезических, гидрологических и экологических исследований, сбор географических и экономических сведений, необходимых для формирования проекта трубопровода и горно-обогатительного комплекса.
- при проектировании линий электропередач.

В режиме реального времени карты плотности грозовых разрядов позволяют с большой точностью определить очаг возгорания в лесном массиве.

Анализ пространственно-временных характеристик включает в себя не только построение карт интенсивности грозовой деятельности, но и оценку риска наступления чрезвычайной ситуации связанной с грозой. В качестве прогнозирующего параметра риска возникновения предлагается ввести значение эксцентриситета модельного эллипса, оконтуривающего грозовой объект. Его значение лежит в интервале от 0 до 1, и при значении близком к 1 грозовой объект принимает наиболее вытянутую форму, близкую к прямой линии. Таким образом, если эксцентриситет выше приемлемого уровня 0,6, то это свидетельствует о повышенной плотности грозовых разрядов внутри грозового объекта и в этом случае необходимо принимать защитные меры.

Выводы к главе

Представлены практические рекомендации по применению метода комплексного мониторинга грозовой активности, а также практические рекомендации по оценкам риска наступления чрезвычайной ситуации связанной с грозой.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработан и применен метод комплексного мониторинга грозовой активности Якутии. Представлены методические рекомендации по применению метода комплексного мониторинга грозовой активности, а также практические рекомендации по оценкам риска наступления чрезвычайной ситуации, связанной с грозой.

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработан метод местоопределения грозового разряда для двухпунктовой системы грозопеленгации, повышающий точность определения координат. Метод реализуется с применением одной из трех методик дальнометрии в зависимости от угла прихода атмосферика.
2. Разработан метод построения модели грозового очага в виде кластера, в том числе в случае перекрывающихся грозовых объектов.
3. Исследованы пространственно-временные характеристики грозовой деятельности в Якутии. Показано, что флуктуации плотности грозовых очагов достаточно велики: от $0,1 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ до $0,3 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ и варьируются в зависимости от места возникновения. Средняя плотность потока разрядов по регистрируемой площади составляет $0,148 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$.
4. Исследована форма грозовых объектов. Установлено, что она является эллиптической и с увеличением эксцентриситета (вытянутости грозового кластера) растет интенсивность грозы.

5. Предложено в качестве прогнозирующего параметра риска возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с грозой, ввести значение эксцентриситета модельного эллипса.

6. На территории Якутии установлены области повышенной плотности грозовых разрядов при помощи карт плотности грозовых разрядов.

7. Разработаны практические и методические рекомендации по применению метода комплексного мониторинга грозовой активности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев, В. С. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии / В. С. Соловьев, В. И. Козлов, В. А. Муллаяров. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. – 108 с.
2. Александров, М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ- и НЧ-диапазонов и их источников / М. С. Александров // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №. 10. – С. 3-25.
3. Козлов, В. И. Грозовая активность в Якутии / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – 104 с.
4. Кононов, И. И. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов / И. И. Кононов, И. А. Петренко, В. С. Снегуров. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 221 с.
5. Панюков, А. В. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности / А. В. Панюков, Д. В. Будуев, Д. Н. Малов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика, Физика, Химия. – 2003. – №. 8. – С. 24.
6. Аджиев, А. Х. Грозы Северного Кавказа / А. Х. Аджиев, Е. М. Богаченко. – Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2011. – 149 с.
7. Трусковский, П. Анализ методов и средств однопозиционной пассивной радиолокации грозовых очагов / П. Трусковский // Proceedings of International Conference RelStat'04. Transport and Telecommunication. – Vol.6, №3. – 2005. – С. 431-437.

8. Васильев, А.Е. Грозовая активность на Востоке Сибири по наблюдениям с помощью однопунктового грозопеленгатора-дальномера: дис. ... канд. ф.-м. наук: 25.00.29 / Васильев Алексей Егорович. – Якутск, 2005. – 147 с.
9. Вальков, С. П. Однопунктовая пеленгация дальних атмосфериков / Вальков С. П. [и др.] // Геофизические явления на авроральных широтах / Ред. Е.Ф. Вершинин. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. – 1990. – С. 117-120.
10. Иванов, В. И. Методы однопунктовой дальнометрии средней зоны / В. И. Иванов, И. И. Кононов, В. И. Николаев // Атмосферное электричество. – 1984. – С. 166.
11. Будуев, Д. В. Однопунктовая система пассивного мониторинга грозовой деятельности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Будуев Денис Владимирович. – Челябинск, 2004. – 125 с.
12. Снегуров, А. В. Методика и результаты наблюдений за грозами, системами пеленгации гроз и МРЛ / А. В. Снегуров, А. В. Снегуров, Г. Г. Щукин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – №. 12. – С. 38-49.
13. Козлов, В.И. Инструментальные наблюдения грозовой деятельности в Якутии в 1993-94 гг. / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров // Метеорология и гидрология. – 1996. – №2. – С. 105-109.
14. Ершова, Т. В. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям / Т. В. Ершова, В. П. Горбатенко // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2011. – №. 5. – С. 150-154.
15. Козлов, В. И. Использование GPS для синхронизации регистрации ОНЧ-сигналов / В. И. Козлов, Р. Р. Каримов, В. А. Муллаяров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, №. 1. – С. 132-137.
16. Козлов, В. И. Исследование грозовых разрядов в Северной Азии с помощью зондирования сетью пассивных радаров / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, Р. Р. Каримов // Зондирование земных покровов радарными с синтезированной

апертурой: сб. докл. Российской науч. конф. – М.: Издание JRE – ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010 г. – С. 613-621.

17. Lay, E. H. Introduction to the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) / Lay E. H. [et al.] // Geophys. Res. Abstr. – 2005. – Т. 7. – С. 2875.

18. Раков, В. А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний / В. А. Раков // Метеорология и гидрология. – 1990. – №1. – С.118-123.

19. Wood, T. G. Localization of individual lightning discharges via directional and temporal triangulation of spheric measurements at two distant sites / T. G. Wood, U. S. Iman // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2004. – Т. 109. – №. D21.

20. Лободин, Т. В. Карта суммарного числа грозовых разрядов для территории СССР. // Труды ГГО. – 1986. – Вып.498. – С.72-75.

21. Юман, М. Молния. – М.: Мир, 1972. – 327 с.

22. Иньков, В. К. Широтные особенности грозовой деятельности / В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин // Труды ГГО. Атмосферное электричество. – 1981. – Вып. 442. – С. 34-38.

23. Файзулин, Н. А. Импульсный электромагнитный грозодальномер ближней зоны / Н. А. Файзулин, И. И. Кононов, В. Д. Плотников // Труды ГГО. – 1975. – Вып. 386. – С. 116-123.

24. Бару, Н. В. Радиопеленгаторы - дальномеры ближних гроз / Бару Н. В. [и др.] – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 143 с.

25. Белоцерковский, А. В. Активно-пассивная радиолокация грозовых и грозоопасных очагов в облаках / А. В. Белоцерковский [и др.] // СПб. : Гидрометеиздат. – 1992. – 215 с.

26. Малов, Д. Н. Многопунктовые системы пассивного мониторинга грозовой деятельности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Малов Дмитрий Николаевич. – Челябинск, 2005. – 207 с.

27. Orville, R. E. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989–98 / R. E. Orville, G. R. Huffines // Monthly Weather Review. – 2001. – Т. 129, №. 5. – С. 1179-1193.

28. Abarca, S. F. An evaluation of the worldwide lightning location network (WWLLN) using the national lightning detection network (NLDN) as ground truth / S. F. Abarca, K. L. Corbosiero, T. J. Galarneau // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2010. – Т. 115, № D18206. – P. 1-11.
29. Константинова, Д.А. Пространственное распределение параметров грозовой активности и конвекции над Западной Сибирью: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30 / Константинова Дарья Александровна. – СПб, 2013. – 150 с.
30. Lewis, E.A. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin / E. A. Lewis, R. B. Harvey, J. T. Rasmussen // *J. Geophys. Res.* – 1960. – V. 65. – P. 1879-1905.
31. Krider, E.P. A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes/ E. P. Krider, R. C. Noggle, M. A. Uman // *J. Appl. Meteorol.* – 1976. V. 15. – P. 301-306.
32. World Wide Lightning Location Network [Электронный ресурс]. – URL: <http://wwlln.net/publications> (дата обращения: 21.09.2015).
33. Чернева Н. В. Перспективы использования Всемирной сети локации гроз (WWLLN) для определения пепловых извержений вулканов на Камчатке / Н. В. Чернева [и др.] // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. тр. науч.- технич. конф.* – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 415-419.
34. World Wide Lightning Location Network [Электронный ресурс]. – URL: <http://webflash.ess.washington.edu> (дата обращения: 10.01.2017).
35. Петренко, И. А. Оценка возможностей использования многопунктовых систем местоопределения молниевых разрядов / И. А. Петренко [и др.] // *Атмосферное электричество*. – 1984. – С. 179.
36. Козлов, В. И. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, Р. Р. Каримов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2011. – Т. 8. – С. 257-262.

37. Козлов, В.И. Вариации импульсной составляющей грозовых радиозумов и сигналов ОНЧ радиостанций по наблюдениям в Якутске в течение цикла солнечной активности 2001-2013 гг. / В. И. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2015. – Т.12, №1. – С.51-59.
38. Козлов, В. И. Суточно-сезонные вариации атмосфериков / В. И. Козлов, Г. В. Федорова, С. Н. Шабаганова // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2009. – Т. 6, № 4. – С. 29–34.
39. Козлов, В. И. Выделение грозовых очагов на примере данных регистратора LD-250 за летние месяцы 2008 года в Южной Якутии / В. И. Козлов, С. Н. Шабаганова // X межрегиональная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: Тез. докл. – Нерюнгри, 2009. – С. 87-88.
40. Ремизов, Л. Т. Характеристики импульсных атмосферных радиопомех очень низких частот вблизи грозового очага / Л. Т. Ремизов, А. Г. Паскуаль, И. В. Олейникова // Радиотехника и электроника. – 1987. – Т.32. – С. 2038-2046.
41. Филиппов, А. Х. Грозы Восточной Сибири / А. Х. Филиппов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 75 с.
42. Алехина, Н.М. Изменения грозовой активности над Западной Сибирью / Н. М. Алехина, В. П. Горбатенко // Региональный мониторинг атмосферы. Часть 4. Природно-климатические изменения: Коллективная монография. Под ред. М.В. Кабанова. – Томск: МГП «РАСКО», 2000. – 270 с.
43. Соколова, Г. Экономико-социологический словарь / Г. Соколова, О. Кобяк. – М. : Litres, 2014. – 439 с.
44. Леончик, Е. Ю. Кластерный анализ. Терминология, методы, задачи / Е. Ю. Леончик, О. В. Савастру. – Одесса: ОНУ им. И. И. Мечникова, 2007. – 67 с.
45. Советов, Б. Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
46. Мандель, И.Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.

47. Tryon, R. C. Cluster analysis: Correlation profile and orthometric (factor) analysis for the isolation of unities in mind and personality / R. C. Tryon. – London: Ann Arbor Edwards Bros, 1939. — 139 p.
48. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
49. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян [и др.] — М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
50. Воронцов, К.В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования [Электронный ресурс] /К. В. Воронцов // ВЦ РАН: сайт. – Режим доступа: <http://www.ccas.ru/voron/download/Clustering.pdf>. – Дата обращения 5.03.2015).
51. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистический данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цефель, В. Е. Момот. – СПб.: ООО «ДивСофт ЮП», 2002. – 601 с.
52. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / О. Дж. Ким [и др.]; под ред. И. С. Енюкова. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 215 с.
53. Жданов, А. С. Значимость и устойчивость автоматической классификации в задаче поиска оптимального разбиения / А. С. Жданов, В. С. Костин // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях. – 2002. – №. 3. – С. 36-42.
54. Коваль, П. Н. Использование кластеризации при анализе данных / П. Н. Коваль // Управляющие системы и машины. – 2010. – №. 6. – С. 32-34.
55. Сивоголовко, Е.В. Оценка качества кластеризации в задачах интеллектуального анализа данных : автореф. дис. ... канд. ф.-м. наук: 05.13.11 / Сивоголовко Елена Владимировна. – СПб., 2014. – 14 с.
56. Петрук, В. Применение локальных бинарных шаблонов к решению задачи распознавания лиц / В. Петрук, А. В. Самородов, И. Н. Спиридонов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2011. – №. 5. – С. 58-63.

57. Шитиков, В.К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
58. Mahalanobis, P. C. Analysis of race-mixture in Bengal. Presidential Address. – Indian Science Congress, 1925.
59. Амелькин, С. А. Обобщенное расстояние Евклида-Махаланобиса и его свойства / С. А. Амелькин, А. В. Захаров, В. М. Хачумов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2006. – №. 4. – С. 40-44.
60. Чуракова, И. Ю. Направления использования методик выявления аномальных наблюдений при решении задач операционного менеджмента // Научный доклад № 13 (R) — СПб.: ВШМ СПбГУ. – 2010. – 27 с.
61. Soete, G. Optimal variable weighting for ultrametric and additive tree clustering / G. Soete // Quality & Quantity. – 1986. – Т. 20, №. 2. – С. 169-180.
62. Macnaughton-Smith, P. The Classification of Individuals by the Possession of Attributes Associated with a Criterion / P. Macnaughton-Smith // Biometrics. – 1963. – Т. 19, №. 2. – С. 364-366.
63. Буреева, Н. Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA» / Н. Н. Буреева. – Нижний Новгород: ННГУ, 2007. – 112 с.
64. Fix, E. Discriminatory analysis-nonparametric discrimination: consistency properties / E. Fix, Jr. J. L. Hodges. – California Univ Berkeley, 1951. – 21 p.
65. Хант, Э. Искусственный интеллект / Э. Хант. – М.: Мир, 1978. – 558 с.
66. Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, Р. Харт. – М.: Мир, 1976. – 509 с.
67. Steinhaus, H. Sur la division des corp materiels en parties / H. Steinhaus // Bull. Acad. Polon. Sci. – 1956. – Т. 1, №. 804. – С. 801.
68. Lloyd, S. P. Least squares quantization in PCM / S. P. Lloyd // IEEE Transactions on information theory. – 1982. – Vol. IT-28, №2. – С. 129-137.
69. Суслов, С. А. Кластерный анализ: сущность, преимущества и недостатки / С. А. Суслов // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Т. 1, №. 1. – С. 51-56.

70. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных: учеб. пособие для вузов / А. П. Кулаичев. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
71. Мониторинг городской среды Сибири: принципы формирования базы данных об опасных метеорологических явлениях / П. М. Нагорский [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2016. – №. 3 (14). – С. 53-63.
72. Мареев, Е.А. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003-2007 гг./ Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 709-720.
73. Архипова, Е.П. Карты географического распределения числа дней с грозой на территории СССР / Е. П. Архипова // Труды ГГО, 1957. – Вып. 74. – С. 41-60.
74. Кононов, И. И. Кластерный анализ грозовой активности / И. И. Кононов, И. Е. Юсупов // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, №. 3. – С. 283-291.
75. Матвеев, Л. Т. Динамика облаков / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
76. Качурин, Л. Г. Эволюция фронтальных грозовых очагов / Л. Г. Качурин [и др.] // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. – 1979. – Т. 15, №. 2. – С. 187-193.
77. Александров, М.С. Флуктуации магнитного поля Земли в диапазоне СНЧ / М. С. Александров [и др.] – М.: Наука, 1972. – 195 с.
78. Лебедев, С. Л. Трехмерная нестационарная модель атмосферной конвективной ячейки с облаком / С. Л. Лебедев // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1966. – Т. 2, №1. – С. 14-27.
79. Mogil, H. M. Extreme weather: Understanding the science of hurricanes, tornadoes, floods, heat waves, snow storms, global warming and other atmospheric disturbances / H. M. Mogil. – New York: Black Dog & Leventhal Publishers, 2007. – 304 p.
80. International cloud atlas / World Meteorological Organization. – Geneva, Vol. II 1987. – 196 p.
81. Метлицкая, Д. В. Имитационная модель метеообстановки и ее применение при исследовании бортового ПО / Д. В. Метлицкая, Г. Ю. Христофоров // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2013: сб. тр. науч.-

- практич. конф. – Казань: Издательство «ФЭН» Академии наук РТ, 2013. – Т. 2. – С. 205-209.
82. Kohn, M. et al. Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data / M. Kohn [et al.] // *Atmospheric Research*. – 2011. – Т. 100, №. 4. – С. 489-502.
83. Шабаганова, С. Н. Алгоритм распознавания грозовых очагов // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»: Тез. докл. – Томск, 2009. – С. 41-43.
84. Шабаганова, С.Н. Выделение грозовых очагов на примере данных регистратора LD-250 в Западной Якутии // XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-15: Тез. докл. – Томск, 2009. – С. 40-41.
85. Загоруйко, Н. Г. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей / Н. Г. Загоруйко, В. Н. Елкина, Г. С. Лбов. — Новосибирск: Наука, 1985. – 110 с.
86. Ball, G. H. ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification / G.H. Ball, D.J. Hall // «Stanford research inst» Menlo Park CA, 1965.
87. Аджиева, А. А. Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети [Электронный ресурс] / А. А. Аджиева, В. А. Шаповалов // *Инженерный вестник Дона: электр. науч. журн.* – 2016. - №2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru>. – (Дата обращения: 21.12.2016).
88. Беликова, М. Ю. Методы и результаты кластеризации данных по грозовым разрядам / М. Ю. Беликова, С. Ю. Кречетова, А. А. Перелыгин // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2016. – Т. 89, №. 1. – С. 97-100.
89. Перелыгин, А. А. Кластеризация многомерных данных: методы, алгоритмы, программы / А. А. Перелыгин // *Вестник Алтайского государственного педагогического университета*. – 2016. – №. 25. – С. 24-31.
90. Gong, X. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America east of the Rockies / X. Gong, M. B. Richman // *Journal of climate*. – 1995. – Т. 8, №. 4. – С. 897-931.

91. Zagouras, A. Determination of measuring sites for solar irradiance, based on cluster analysis of satellite-derived cloud estimations / A. Zagouras [et al.] // *Solar Energy*. – 2013. – Т. 97. – С. 1-11.
92. Lakshmanan, V. Multiscale storm identification and forecast / V. Lakshmanan, R. Rabin, V. DeBrunner // *Atmospheric Research*. – 2003. – Т. 67. – С. 367-380.
93. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester [et al.] // *Kdd*. – 1996. – Т. 96, №. 34. – С. 226-231.
94. Hutchins, M. L. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, J. B. Brundell // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – Т. 119, №. 1. – С. 620-629.
95. Шабаганова, С. Н. Характеристики грозových ячеек по наблюдениям в Якутии / С. Н. Шабаганова [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2012. – № 12. – С. 35–43.
96. Kononov, I. I. Cluster analysis of storm activity / I. I. Kononov, I. E. Yusupov // *Journal of communications technology and electronics c/c of Radiotekhnika i Elektronika*. – 2004. – Т. 49, №. 3. – С. 260-266.
97. Торопов, А.А. Исследование грозových электромагнитных полей на Северо-Востоке Азии: дис.: ... канд. ф.-м. наук: 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы / Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2016. 204 с.
98. Ремизов, Л.Т. Естественные радиопомехи / Л. Т. Ремизов. – М.: Наука, 1985. – 196 с.
99. Козлов, В. И. Инструментальные наблюдения гроз в Якутии в 2003-2006 годах / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, Р. Р. Каримов // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2008. – Т. LI. №10. – С. 825-829.
100. Верещагин, И.П. Анализ опыта работы автоматизированных систем определения мест удара молнии / И. П. Верещагин, М. А. Кошелев, А. В. Орлов, А. Г. Темников // *Новое в Российской электроэнергетике*. – 2004. – № 4. – С.6-15.
101. Козлов В.И., Орлов В.А. Способ измерения фазового сдвига. Авторское свидетельство № 1135303. – 1984.

102. Махоткин, Л. Г. Вопросы оперативного использования данных наблюдений по счетчикам грозových разрядов / Л. Г. Махоткин [и др.] // Труды ГГО. – 1980. – Вып. 424.
103. Богушов, А. К. Вторичная обработка результатов пассивного мониторинга грозовой деятельности / А. К. Богушов, А. В. Панюков // Молодежная школа-конференция: сб. тр. – Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН, 2009. – С. 286-290.
104. Богушов, А. К. Размещение взаимосвязанных объектов в условиях неопределенности / А. К. Богушов, А. В. Панюков // Проблемы оптимизации и экономические приложения: сб. тр. науч.-практич. конф. – Омск: Полиграф. Центр КАН, 2009. – С.113.
105. Козлов, В. И. Погрешности методов наблюдения грозových разрядов одно- и двухпунктовыми системами грозолокации / В. И. Козлов, А. Ю. Маркова, С. Н. Шабаганова // Наука и образование. – 2010. – № 1. – С. 7–12.
106. Lin, Y. T. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements / Lin Y. T. [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1979. – Т. 84, №. C10. – С. 6307-6314.
107. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М: «Наука», 1974. – 832 с.
108. Шабаганова, С. Н. Оценка погрешностей методов наблюдения грозových разрядов двухпунктовыми системами грозолокации Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире / С. Н. Шабаганова, А. Ю. Маркова // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: сб. тр. науч.-практич. конф. – Мирный: МПТИ (ф) СВФУ, 2009. – С. 58-61.
109. Информационный образовательный ресурс локального доступа «Алгоритм нахождения грозového разряда с помощью многопунктовой системы грозолокации»: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 16423 / Каримов Р. Р., Шабаганова С. Н., Козлов В. И. № 50201050199; заявл. 12.08.2010; опубли. 18.11.2010. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 11, С. 9.

110. Ярославский, Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику / Л. П. Ярославский. – М.: Радио и связь, 1987. – 220 с.
111. Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
112. Tuomi, T. J. Identification and analysis of flash cells in thunderstorms / T. J. Tuomi, M. Larjavaara // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2005. – Т. 131, №. 607. – С. 1191-1214.
113. Иванов, О. П. Специфика циклонических обстановок для авиаполетов / О. П. Иванов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2008. – №134 – С. 63-67.
114. Граничина, Н. О. Рандомизированный алгоритм устойчивой кластеризации / Н. О. Граничина, Д. С. Шалымов // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2009. – Т. 5, №. 1-1. – С. 167-192.
115. Hartigan, J. A. Statistical theory in clustering / J. A. Hartigan // Journal of classification. – 1985. – Т. 2, №. 1. – С. 63-76.
116. Wishart, D. Mode analysis: A generalization of nearest neighbor which reduces chaining effects / D. Wishart // Numerical taxonomy. – 1969. – Т. 76, №. 282-311. – С. 17.
117. Шабаганова, С. Н. Применение кластерного анализа для выделения грозовых очагов / С. Н. Шабаганова, В. И. Козлов // Динамика сложных систем - XXI век. – 2010. – № 2. – С. 43–47.
118. Шабаганова, С. Н. Применение методов кластерного анализа для выделения грозовых очагов / С. Н. Шабаганова, В. И. Козлов // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: сб. тр. науч.-практич. конф. – Мирный: МПТИ (ф) СВФУ, 2009. – С. 51-54.
119. Sturges, H. A. The choice of a class interval / H. A. Sturges // Journal of the American statistical association. – 1926. – Т. 21, №. 153. – С. 65-66.

120. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 350 с.
121. Информационный образовательный ресурс локального доступа «Двухступенчатый алгоритм кластерного анализа для выделения и описания свойств грозových очагов»: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 16819 / Шабаганова С.Н., Козлов В.И. № 50201150385; заявл. 19.08.2010; опубл. 22.03.2011. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 3, С. 17.
122. Прокимнов, Н. Н. Моделирование мониторинговых процессов / Н. Н. Прокимнов // Прикладная информатика. – 2010. – № 6 (30). – С. 90-100.
123. Соловьев, В. С. Исследование особенностей недельных вариаций лесопожарной активности в Якутии / В. С. Соловьев, В. И. Козлов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6, №. 2. – С. 434-440.
124. Свидетельство № 2015618968 Российская Федерация. Программа кластеризации грозových разрядов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шабаганова С.Н., Козлов В.И. ; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО Северо-Восточный Федеральный Университет. – №2015615594; зарегистр. 20.08.2015. – 1 с.
125. Бильгаева, Л. П. Оценка качества алгоритмов кластеризации / Л. П. Бильгаева, З. Г. Самбялов // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – №6. – С. 53-60.
126. Филиппов, А. Х. Статистические характеристики гроз Якутии / А. Х. Филиппов, Д. Ф. Хуторянская // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – 1971. – Вып.31. – С. 39-46.
127. Васильев, И. С. Пространственное распределение осадков в Якутии / И. С. Васильев, Я. И. Торговкин // Метеорология и Гидрология. – 2002. – №6. – С.23-32.
128. Козлов, В. И. Характеристики грозových очагов по наблюдениям в Якутии / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, С. Н. Шабаганова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 4. – С. 35–40.

129. Иванидзе, Т.Г. Некоторые характеристики режима и аэросиноптических условий грозовой деятельности в Якутии / Т. Г. Иванидзе // Метеорология и гидрология. – 1967. – №2. – С. 78-82.
130. Климат Якутска / Под ред. Ц. А. Швер, С. А. Изюменко. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.
131. Гвоздецкий, Н.А. Физическая география СССР. Азиатская часть / Н. А. Гвоздецкий, Н. И. Михайлов. – М.: Государственное издательство географической литературы, 1963. – 572 с.
132. Lay E. H. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil / E. H. Lay [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2004. – Т. 31, №. 3.
133. Шабаганова, С. Н. Суточно-сезонные вариации импульсной составляющей ради шумов ОНЧ диапазона по наблюдениям в Якутске / С. Н. Шабаганова, Г. В. Федорова // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: сб. тр. науч.-практич. конф. – Мирный: МПТИ (ф) СВФУ, 2009. – С. 61-64.
134. Дульзон, А. А. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области / А. А. Дульзон, В. П. Горбатенко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, №. 2. – С. 126-130.
135. Hutchins, M. L. Relative detection efficiency of the world wide lightning location network / M. L. Hutchins [et al.] // Radio Science. – 2012. – Т. 47, №. 6.
136. Колоколов, В. П. Соотношение между некоторыми грозовыми параметрами / В. П. Колоколов, Г. П. Павлова // Труды ГГО. – 1972. – №. 277. – С. 38-41.
137. Лободин, Т.В. Длительность отдельных гроз на территории СССР / Т. В. Лободин, Л. В. Огуряева // Труды ГГО. Атмосферное электричество. – Вып.350. – 1977. – С. 74-79.
138. Заболотников, Г. В. Использование международных авиационных метеорологических кодов METAR (SPECI) и TAF: учебное пособие по курсу «Авиационная метеорология» / Г. В. Заболотников, М. Г. Весёлкин. – СПб: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2006.

139. Zipser, E. J. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? / E. J. Zipser, K. R. Lutz // *Monthly Weather Review*. – 1994. – Т. 122, №. 8. – С. 1751-1759.
140. Аджиева, А. А. Опасные конвективные процессы на территории Северного Кавказа / А. А. Аджиева, В. А. Шаповалов, И. Х. Машуков // *Экологические проблемы современности: международный науч.-практич. семинар*. – Майкоп, 2009. – С. 9-19.
141. Vujović, D. The behavior of the radar parameters of cumulonimbus clouds during cloud seeding with AgI / D. Vujović, M. Protić // *Atmospheric Research*. – 2017. – Т. 189. – С. 33-46.
142. Mohee, F. M. Climatology of thunderstorms for North Dakota / F. M. Mohee, C. Miller // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2010. – Т. 49, №. 9. – С. 1881-1890.
143. Rigo, T. Analysis of warm season thunderstorms using an object-oriented tracking method based on radar and total lightning data / T. Rigo, N. Pineda, J. Bech // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2010. – Т. 10, №. 9. – С. 1881-1893.
144. Cummins, K. L. The US National Lightning Detection Network/sup TM/and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities / K. L. Cummins, E. P. Krider, M. D. Malone // *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. – 1998. – Т. 40, №. 4. – С. 465-480.
145. Kuznarová, H. Celltrack—Convective cell tracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics / H. Kuznarová, P. Novák // *Atmospheric Research*. – 2009. – Т. 93, №. 1. – С. 317-327.
146. Вальков, С. П. Аппаратура для регистрации ОНЧ-излучения / С. П. Вальков, Г. И. Дружин, В. Д. Швецов, Ю. П. Никитин, В. Г. Петров // *Низкочастотные сигналы во внешней ионосфере*. – Якутск: ЯФ СО РАН, 1976. – 215 с.
147. Jean, A.G. Calibration of loop antennas at VLF / A. G. Jean, H. E. Taggart, J. R. Wait // *J. Res. NBS*. – 1961. – Ser. D. – Vol. 65, № 3. – P. 189-193.

148. Адамович, А. Модули GPS. Принцип действия, классификация и технические возможности / А. Адамович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №. 3. – С. 10-12.
149. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017 г. – 32 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Свидетельство о регистрации электронного ресурса №16423

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ОБРАЗОВАНИЯ
ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ И МОНИТОРИНГА
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ФОНД ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ "НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ"

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

№ 16423

Настоящее свидетельство выдано на электронный ресурс, отвечающий требованиям новизны и приоритетности:

Алгоритм нахождения местоположения грозового разряда с помощью многопунктовой системы грозолокации

Дата регистрации: 29 ноября 2010 года

Авторы: Шабаганова С.Н., Козлов В.И., Каримов Р.Р.

Организация-разработчик: ГОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

Директор ИНИМ РАО,
чл.-корр. РАО, д.ю.н., проф.  В.Е. Усанов

Руководитель ОФЭРНиО, почетный
работник науки и техники РФ  А.И. Галикина

Дата выдачи 30.11.2010

ПРИЛОЖЕНИЕ П

Свидетельство о регистрации электронного ресурса №16819

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ОБРАЗОВАНИЯ
ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ И МОНИТОРИНГА
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ФОНД ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ "НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ"

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

№ 16819

Настоящее свидетельство выдано на электронный ресурс, отвечающий требованиям новизны и приоритетности:

**Двухступенчатый алгоритм кластерного анализа
для выделения и описания свойств грозовых очагов**

Дата регистрации: 22 марта 2011 года

Авторы: Шабганова С.Н., Козлов В.И.

Организация-разработчик: ГАУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

Директор ИНИМ РАО,
академик РАО, д.ю.н., проф.  В.Е. Усанов

Руководитель ОФЭРНИО, почетный
работник науки и техники РФ  А.И. Галикина

Дата выдачи 22.03.2011



ПРИЛОЖЕНИЕ III

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2015618968
«Программа кластеризации грозовых разрядов»

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова» (RU)*

Авторы: *Шабазанова Светлана Николаевна (RU),
Козлов Владимир Ильич (RU)*

Заявка № **2015615594**
Дата поступления **24 июня 2015 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **20 августа 2015 г.**

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



 Л.Л. Курий

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

ФУНКЦИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данном приложении приведены все функции для предварительной обработки экспериментальных данных.

Процедура, реализующая метод минимального локального расстояния

Листинг IV.1 – Процедура метода минимального локального расстояния

```

procedure TCluster.SingleLinkage(Parameters:TSingleLinkageParameters);
Var i,j:LongInt;
    Distance:Single;
    seli,selj,delitem,newitem:LongInt;
    DMatrix:TMatrix;
    MaxClusterDistance:Single;
begin
    ChildClusters.Clear;

    for i:=0 to ItemsCount-1 do
        begin
            ChildClusters.AddCluster;
            ChildClusters.Clusters[i].AddItem(Items[i].X,Items[i].Y,Items[i].Time);
        end;

    //расчет статистик для расстояния махаланобиса
    if Parameters.MetricsIndex=2 then CalcStatForChildClusters;

    //расчет матрицы расстояний
    DMatrix:=TMatrix.Create;
    DMatrix.InitMatrix(ItemsCount,ItemsCount);
    for i:=0 to ItemsCount-1 do
        for j:=0 to ItemsCount-1 do
            begin
                if i<>j then
                    case Parameters.MetricsIndex of
                        0:
                            DMatrix.Value[i,j]:=GetEvclidDistance(Items[i].X,Items[i].Y,Items[j].X,Items[j].Y);
                        1:

```

Продолжение листинга IV.1

```

DMatrix.Value[i,j]:=GetNormEvclidDistance(Items[i].X,Items[i].Y,Items[j].X,Items[j].
Y,Items[i].Time,Items[j].Time,Parameters.NormXY,Parameters.NormT);
    2:
DMatrix.Value[i,j]:=Mahalanobis(Items[i].X,Items[i].Y,Items[j].X,Items[j].Y,Items[i].
Time,Items[j].Time);
    end;
end;

case Parameters.MetricsIndex of
    0: MaxClusterDistance:=GetEvclidDistance(minx,miny,maxx,maxy);
    1:
MaxClusterDistance:=GetNormEvclidDistance(minx,miny,maxx,maxy,mint,maxt,Para
meters.NormXY,Parameters.NormT);
    2: MaxClusterDistance:=Mahalanobis(minx,miny,maxx,maxy,mint,maxt);
end;

repeat
    Distance:=MaxClusterDistance; seli:=-1; selj:=-1;

    //поиск ближайших элементов
    for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
        for j:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
            begin
                if i<>j then
                    if Distance>DMatrix.Value[i,j] then
                        begin
                            Distance:=DMatrix.Value[i,j];
                            seli:=i; selj:=j;
                        end;
                    end;
            end;

        if Parameters.UseMaxDistance then
            case Parameters.MetricsIndex of
                //2: Distance:=0;
                1,2:
Distance:=GetEvclidDistance(ChildClusters.Clusters[seli].CenterX,ChildClusters.Clust
ers[seli].CenterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildClusters.Clusters[selj].Cent
erY);
            end;

            if (Parameters.UseMaxDistance and (Distance>Parameters.MaxDistance)) or
(ChildClusters.ClustersCount<Parameters.MinClustersCount) then

```

Продолжение листинга IV.1

```

seli:=-1 //ВЫХОД ИЗ ЦИКЛА
else
begin
  if seli<selj then
    begin
      delitem:=seli; newitem:=selj;
    end
  else
    begin
      delitem:=selj; newitem:=seli;
    end;
  ChildClusters.CombineClusters(delitem,newitem);

  //удаление строк и столбцов из матрицы и пересчёт изменённых строк и
  столбцов
  DMatrix.DeleteRow(delitem); DMatrix.DeleteCol(delitem);
  selj:=newitem-1;

  //if Parameters.MetricsIndex=2 then CalcStatForChildClusters;

  for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
    case Parameters.MetricsIndex of
      0:
        DMatrix.Value[i,selj]:=GetEvclidDistance(ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clusters[i].CenterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildClusters.Clusters[selj].CenterY);
      1:
        DMatrix.Value[i,selj]:=GetNormEvclidDistance(ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clusters[i].CenterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildClusters.Clusters[selj].CenterY,ChildClusters.Clusters[i].CenterTime,ChildClusters.Clusters[selj].CenterTime,Parameters.NormXY,Parameters.NormT);
      2:
        DMatrix.Value[i,selj]:=Mahalanobis(ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clusters[i].CenterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildClusters.Clusters[selj].CenterY,ChildClusters.Clusters[i].CenterTime,ChildClusters.Clusters[selj].CenterTime);
    end;

  for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
    case Parameters.MetricsIndex of
      0:
        DMatrix.Value[selj,i]:=GetEvclidDistance(ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildC

```

Продолжение листинга IV.1

```

usters.Clusters[selj].CenterY,ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clusters[
i].CenterY);
    1:
DMatrix.Value[selj,i]:=GetNormEvclidDistance(ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,C
hildClusters.Clusters[selj].CenterY,ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clus
ters[i].CenterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterTime,ChildClusters.Clusters[i].Cent
erTime,Parameters.NormXY,Parameters.NormT);
    2:
DMatrix.Value[selj,i]:=Mahalanobis(ChildClusters.Clusters[selj].CenterX,ChildCluster
s.Clusters[selj].CenterY,ChildClusters.Clusters[i].CenterX,ChildClusters.Clusters[i].Ce
nterY,ChildClusters.Clusters[selj].CenterTime,ChildClusters.Clusters[i].CenterTime);
    end;

end;

until seli=-1;
DMatrix.free;
end;

```

Функция определения метрики Евклида и нормированной метрики Евклида

Листинг IV.2 – Функция определения метрики Евклида и нормированной Евклида

```

function TCluster.GetEvclidDistance(X1, Y1, X2, Y2: Single): Single;
begin
    result:=sqrt(sqr(x1-x2)+sqr(y1-y2));
end;
function TCluster.GetNormEvclidDistance(X1, Y1, X2, Y2: Single; T1,T2:
TTime; NormXY, NormT: Single): Single;
Var T1min,T2min:Single;
begin
    T1min:=MinuteOf(T1)+60*HourOf(T1);
    T2min:=MinuteOf(T2)+60*HourOf(T2);
    result:=sqrt(sqr((x1-x2)/NormXY)+sqr((y1-y2)/NormXY)+sqr((T1min-
T2min)/NormT));
end;

```


Функция определения расстояния Махаланобиса

Листинг IV.3 – Функция определения расстояния Махаланобиса

```
function TCluster.Mahalanobis(X1, Y1, X2, Y2: Single; T1,T2: TTime): Single;
Var ICov,Dev,tdaMulRes:TSingleDynArray;
  i,j:LongInt;
begin
  CalcInverseMatrix3x3(CovarianceMatrixChildClusters,ICov);
  SetLength(Dev,3); SetLength(tdaMulRes,3);
  Dev[0]:=x1-x2; Dev[1]:=y1-y2; Dev[2]:=t1-t2;

  for i:=0 to 3-1 do
  begin
    tdaMulRes[i]:=0;
    for j:=0 to 3-1 do
      tdaMulRes[i]:=tdaMulRes[i]+Dev[j]*ICov[j*3+i];
    end;
  result:=0;
  for i:=0 to 3-1 do
    result:=result+tdaMulRes[i]*Dev[i];
  result:=sqrt(result);
end;
```

Процедура модального анализа данных

Листинг IV.4 – Процедура модального анализа данных

```
procedure TCluster.ShabaganovaSplitByMinClasterisation(PointsInCluster: Integer);
Var MaxPointInCluster,CurrentClustersCount,itercountexit:LongInt;
  i,j,k:LongInt;
begin
  //копирование основного в подкластер
  ChildClusters.Clear;
  ChildClusters.AddClaster;
  for i:=0 to ItemsCount-1 do
  ChildClusters.Clusters[0].AddItem(Items[i].X,Items[i].Y,Items[i].Time);
  repeat
  for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
  begin
    ChildClusters.Clusters[i].ShabaganovaSplitByMin(PointsInCluster);
  end;
```


Продолжение листинга IV.4

```

CurrentClustersCount:=ChildClusters.ClustersCount;
for i:=0 to CurrentClustersCount-1 do
begin
  if ChildClusters.Clusters[i].ChildClusters.ClustersCount>0 then
  begin
    for j:=0 to ChildClusters.Clusters[i].ChildClusters.ClustersCount-1 do
      begin
        ChildClusters.AddCluster;
        for k:=0 to ChildClusters.Clusters[i].ChildClusters.Clusters[j].ItemsCount-1
do
          ChildClusters.Clusters[ChildClusters.ClustersCount-
1].AddItem(ChildClusters.Clusters[i].ChildClusters.Clusters[j].Items[k].X,ChildCluster
s.Clusters[i].ChildClusters.Clusters[j].Items[k].Y,ChildClusters.Clusters[i].ChildCluster
s.Clusters[j].Items[k].Time);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
  for i:=ChildClusters.ClustersCount-1 downto 0 do
  begin
    if ChildClusters.Clusters[i].ChildClusters.ClustersCount>0 then
      ChildClusters.DeleteCluster(i);
    if ChildClusters.Clusters[i].ItemsCount=0 then
      ChildClusters.DeleteCluster(i);
    end;
  end;

MaxPointInCluster:=0;
for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
begin
  if ChildClusters.Clusters[i].ItemsCount>MaxPointInCluster then
    MaxPointInCluster:=ChildClusters.Clusters[i].ItemsCount;
  end;

itercountexit:=1;
for i:=0 to ChildClusters.ClustersCount-1 do
  if ChildClusters.Clusters[i].IterCount<3 then itercountexit:=-1;
until (MaxPointInCluster<15) or (itercountexit=1);
end;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ V

Акт внедрения результатов диссертации в научно-исследовательскую работу

УТВЕРЖДАЮ

И.о. Директора
Института космофизических исследований
и астрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук
- обособленного подразделения
Федерального исследовательского центра
"Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук"



А.В. Моисеев

2019

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт подтверждает, что результаты работы Шабагановой Светланы Николаевны, представленные в диссертации «Исследование и разработка методов мониторинга грозовой активности Якутии», использовались при выполнении научно-исследовательской работы Института космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук - обособленного подразделения Федерального исследовательского центра "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" на основе экспериментальных данных по грозовой активности в регионе г. Мирного полученных автором, а также разработанного им алгоритма и программного комплекса при анализе данных в регионе Якутии.

Ведущий научный сотрудник
ИКФИА СО РАН
Кандидат физико-математических наук

Д.Г. Баишев

13 мая 2019 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по науке
МППИ (ф) ФГАОУ ВО «СВФУ
им. М.К. Аммосова», к.ф.-м.н.

 А. А. Егорова
«__» _____ 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в учебный процесс Политехнического института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова» в г. Мирном результатов диссертационной работы Шабагановой С.Н. на тему «Исследование и разработка методов мониторинга грозовой активности Якутии»

Результаты диссертационной работы Шабагановой С.Н. внедрены в учебный процесс Политехнического института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный Федеральный университет им. М. К. Аммосова» на кафедре «Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства» и используются при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Переходные процессы в системах электроснабжения».

Методическая и экспериментальная работа позволила повысить уровень подготовки специалистов по выпускаемым специальностям, усовершенствовать исследовательскую часть при выполнении дипломных работ.

Директор МППИ (ф) ФГАОУ ВО
«СВФУ им. М.К. Аммосова», к.г.-м.н.



Е.Э. Соловьев

Зав. кафедрой «Электроэнергетики
и автоматизации промышленного
производства», к.ф.-м.н., доцент



А. С. Семенов

Доцент кафедры «Электроэнергетики
и автоматизации промышленного
производства», к.т.н.



Н. С. Волотковская