

На правах рукописи



**Шабаганова Светлана Николаевна**

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

Специальность

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
**Козлов Владимир Ильич**

Официальные оппоненты: **Целебровский Юрий Викторович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Техника и электрофизика высоких напряжений», профессор

**Швецов Евгений Геннадьевич**,  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, лаборатория мониторинга леса, научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 7 ноября 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_ октября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Кайзер Юрий Филиппович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 атмосферика, 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 аэронавтики 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.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического указателя, содержащего 149 наименований литературных источников. Общий объем диссертации 139 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности к моменту начала исследования, сформулированы цели и вытекающие из них задачи, приведены научная новизна и значимость результатов работы, положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробация результатов исследования.

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена обзору существующих инструментальных систем регистрации грозовых разрядов. Для изучения грозовой активности какой-либо территории требуется определять местоположение грозового разряда с учетом того, что данные грозорегистраторов представляются в зашумленном виде из-за влияния погрешностей определения координат грозового разряда в пунктах наблюдения. Уменьшение погрешностей возможно с помощью построения качественной модели грозового очага, которая снизит влияние шумов, оптимизируя метрологические характеристики приборов.

Рассмотрены принципы действия однопунктовой и многопунктовой систем грозопеленгации, возможности применения данных систем, их достоинства и недостатки. Данной теме посвящен достаточно большой объем исследований, которые принадлежат Ракову В.А., Марееву Е.А., Кононову И.И., Панюкову А.В. и др. Отмечается, что в нашей стране применение многопунктовых систем ограничено из-за отсутствия надлежащей инфраструктуры связи по всему пространству России и наибольшее внимание уделяется развитию однопунктовых методов.

Приведены аналитические статистические методы построения модели грозового очага на основе кластерного анализа. Показаны алгоритмы и методы кластерного анализа, применяемые для выделения таких кластеров как грозовая ячейка и очаг. Рассматривается опыт российских и зарубежных исследователей.

Термин кластерный анализ впервые ввел К. Трион в 1939 году. Ныне известные алгоритмы кластерного анализа были разработаны после 1960-х г. и получили свое отражение в трудах С. А. Айвазяна, Б. Дюрана, И. Д. Манделя. В общем, задача кластеризации ставится следующим образом. Пусть  $X$  – множество объектов,  $Y$  – множество номеров (имён, меток) кластеров. Задана функция расстояния между объектами  $d(X_i, X_j)$ . Имеется конечная обучающая выборка объектов  $X_k = \{x_1, \dots, x_n\} \subset X$ . Требуется разбить выборку на непересекающиеся подмножества, называемые кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из объектов, близких по метрике  $d$ , а объекты разных кластеров существенно отличались.

При кластеризации грозовых облаков используется модель конвективной ячейки, под которой понимается основной неделимый заряженный элемент облака, в нашем случае линейным размером около 25 км. Кластер-конвективная

ячейка определяется такими основными параметрами как время жизни, количество разрядов в ней, ее площадь, интенсивность, поперечные и продольные размеры, формы ячейки и др. Под кластером-грозовым очагом понимается совокупность пространственно близких нескольких кластеров-ячеек протяженностью более 75 км.

Для построения качественной модели грозового очага необходимо улучшить точность определения местоположения группы грозовых разрядов при однопунктовых и двухпунктовых методах, так как данные грозорегистраторов содержат данные с погрешностями: «шумы» и погрешности определения координат грозового разряда в пункте наблюдения.

Таким образом, качественно построенная модель грозового очага позволит исследователям систематизировать законы распределения грозовых кластеров в пространстве и во времени и соотнести их с географическими законами, а также выявить среди грозовых объектов наиболее опасные, угрожающие жизни человека и наносящие ущерб многим сферам его деятельности.

**Вторая глава** посвящена методу определения местоположения грозового разряда и методу построения модели грозового очага.

Представлен метод комплексного мониторинга грозовой активности региона, основанный на методе, который определяет местоположение грозового разряда точнее в сравнении с имеющимися. Получены аналитические зависимости среднеквадратичных погрешностей определения дальности и разработан алгоритм оптимального определения местоположения для двухпунктовой системы грозолокации. При наличии большего количества пунктов уточнение местоопределения предполагается производить путем усреднения координат, полученных двухпунктовыми системами.

Установлены точности местоопределения однопунктовой системы для различного положения источника радиоимпульса грозового разряда относительно пункта регистрации. Однозначность положения разряда обнаруживается при определении направления прихода электромагнитного сигнала в пункт наблюдения и оценки дальности до его источника.

Среднеквадратичная погрешность  $\Delta L$  при однопунктовых наблюдениях по измеренным характеристикам амплитудных и спектральных признаков атмосферика выражается формулой:

$$\Delta L = D_1 \cdot \left( \frac{N}{U^2 + U_{\Phi}^2} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $D$  – нормировочный коэффициент,  $U$  – разность потенциалов на выходе усилительных трактов соответствующих каналов пропорциональна  $E$  и  $H$ , допуская, что  $N_{+} = N_{-} = N$ . Усиление каналов подбирается так, чтобы  $U_E = U_H = U$ .

Экспериментальная статистическая оценка погрешности определения дальности однопунктовой системы на примере применяемых в гг. Якутск, Нерюнгри, Мирный однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров LD-250 фирмы BOLTEK проведена по повторным 108 атмосферикам,

зарегистрированным 6 августа 2003 г. Для расстояний 50 – 450 км относительная погрешность оценки определения дальности имеет постоянную величину 12% с колебаниями от 6 до 18%. Точность определения направления прихода для однопунктовых систем значительно выше точности определения дальности. Экспериментальная оценка точности определения направления прихода для грозорегистратора, разработанного ИКФИА составляет  $\pm 2,5^\circ$ .

При постановке двухпунктовой системы грозолокации возможно использование триангуляционного или гибридного методов определения местоположения грозового разряда.

Суть триангуляционного метода состоит в определении местоположения грозового разряда путем вычисления его координат по двум измеренным углам прихода атмосферика относительно базы  $\varphi_1^*$  и  $\varphi_2^*$  (пеленгам) и расстоянию между пунктами приема (базой) путем нахождения элементов треугольников, образованных точками грозового разряда и пунктами пеленгования.

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  $\Delta L < 0,1l$ .

Анализ формулы (2):

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

выполненный в математическом пакете Maple 9, показывает, что погрешность определения дальности триангуляционного метода с ограничением  $\Delta L < 0,1l$  достигается при  $\varphi < 2,3$  радиана.

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.

Среднеквадратичная погрешность гибридного метода определяется как:

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot (l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot l \cdot \sin \varphi}{(2 \cdot l \cdot \cos \varphi - 2 \cdot T \cdot c)^2} \cdot \Delta \varphi\right)^2 + \left(\left(\frac{(l^2 - T^2 \cdot c^2) \cdot c}{(l \cdot \cos \varphi - T \cdot c)^2} - \frac{T \cdot c^2}{(l \cdot \cos \varphi - T \cdot c)}\right) \cdot \Delta t\right)^2}, \quad (3)$$

Из анализа (3) следует, что погрешность определения дальности триангуляционного метода с ограничением  $\Delta L < 0,1l$  достигается при  $\varphi < 1,4$  радиана. Причем из сравнения с триангуляционным методом следует, что в этом диапазоне углов погрешность гибридного метода меньше.

Каждый из однопунктовых грозопеленгаторов работает всенаправленно и его рабочей зоной является окружность с центром в пункте наблюдения.

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

разными методами для получения наилучшей точности локации грозового разряда.

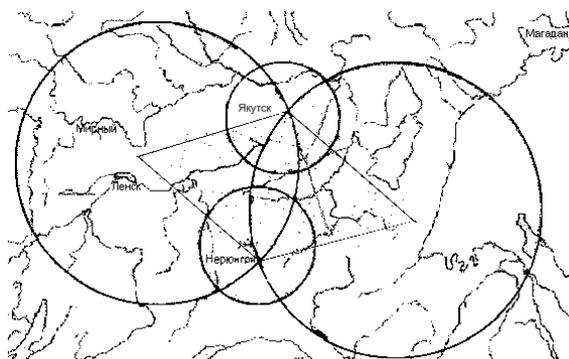


Рисунок 1 – Рабочая зона ( $\Delta L < 0,1l$ ) двухпунктовой системы Якутск – Нерюнгри. Большой круг – зона триангуляционного метода, малый – однопунктового метода и ромб-гибридного метода

Для выделения грозового очага, при наличии информации о времени прихода и координатах грозовых разрядов, предлагается использовать метод двухступенчатого алгоритма кластерного анализа, который позволяет выделить и описать грозовые объекты.

Пусть множество  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  обозначает  $n$  объектов, в нашем случае грозовых разрядов, принадлежащих некоторой популяции  $\pi$  – совокупности грозовых разрядов за любой интервал времени. При этом каждый объект  $I_j$  из множества грозовых разрядов обладает некоторым набором наблюдаемых характеристик-признаков. Результаты измерений признаков грозовых разрядов представим в виде векторов  $X_j = (x, y, t)$ . Данное множество  $X$  – есть  $n$  точек (разрядов) в евклидовом пространстве. Вводится взвешенное евклидово расстояние, где подбором весов будет произведена попытка нормировать оси пространства поскольку признаки определены в разных единицах измерения:

$$d(I_i, I_j) = \sqrt{w_x(x_i - x_j)^2 + w_y(y_i - y_j)^2 + w_t(t_i - t_j)^2}, \quad (4)$$

В качестве веса для измерений были приняты:

$$w_x = \frac{1}{\sigma_x^2}, \quad w_y = \frac{1}{\sigma_y^2}, \quad w_t = \frac{1}{\sigma_t^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_t^2$  – эмпирические (выборочные) дисперсии признаков  $X$  и  $t$  соответственно.

Дополнительно, в качестве теста, включено расстояние Махаланобиса:

$$D^2(I_i, I_j) = (I_i - I_j)^T C^{-1}(I_i - I_j), \quad (6)$$

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.

Первичная кластеризация осуществляется с помощью метода минимального локального расстояния.

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  $d(I_i, I_j)$ :

$$D = \begin{pmatrix} 0 & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Шаг 2. Поиск наименьшего элемента матрицы попарных расстояний:

$$d_1(I_i, I_j) = \min d(I_i, I_j). \quad (8)$$

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  $\mu_i(X_{ic}, Y_{ic}, t_{ic})$ :

$$X_{ic} = \frac{1}{m} \sum X_{ik}, \quad Y_{ic} = \frac{1}{m} \sum Y_{ik}, \quad t_{ic} = \frac{1}{m} \sum t_{ik}. \quad (9)$$

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. Условиями остановки данная процедура являются следующие условия:

- $\min d(I_i, I_j) > 75$  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:

$$\Phi_0 = \sum_{y \in Y} \frac{1}{|I_y|} \sum_{i: y_i=y} d(I_i; \mu_y) \rightarrow \min, \quad (10)$$

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

Для обоснования выбора порогового расстояния и порогового числа элементов кластера воспользовались экспертными оценками, полученными с помощью радиолокационных методов наблюдений за грозами. Условие по дальности для выделения грозового очага 75 км.

При дальнейшем разбиении на кластеры для выделения грозовых объектов предлагается воспользоваться методами, которые определяют моды мультимодальных распределений и соответствующие им отдельные кластеры.

Процедура модального анализа, предложенного Д. Уишартом, 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, относятся к ближайшей моде.

Если провести ось через центр кластера, на гистограммах распределения частот попадания точек в интервал, можно увидеть, как «наслоение» кластеров, так и относительно хорошо разделенные кластеры. Вращаем ось с шагом  $2,5^\circ$ , так как стандартное отклонение погрешности пеленгования составляет  $2,5^\circ$  для всех направлений. При этом для каждого угла строятся гистограммы частот по оси вращения, для анализа на мультимодальность. После изменения угла от  $\theta$  до  $2\pi$ , 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  $\alpha$  разбиения находится исходя из следующих условий (11):

$$\text{len } G \rightarrow \max, m \rightarrow \min, \frac{n}{m} \rightarrow \max, \quad (11)$$

На основе предложенного алгоритма кластеризации грозовых разрядов и определения параметров кластеров создана программа на языке Object Pascal в среде Delphi.

В **третьей главе** приведена интерпретация натурального эксперимента и выявлены новые закономерности, характеризующие грозовой очаг.

Решены задачи определения и оценки основных параметров различных грозовых областей и выявлены новые закономерности, характеризующие изучаемый объект. Приведен анализ параметров грозовых кластеров, полученных с применением программного обеспечения, реализующего методы и алгоритмы, с использованием экспериментальных данных грозопеленгаторов.

После проведения процедур разделения грозовых разрядов по классам в условиях поставленной задачи определены параметры полученных кластеров.

Для получения параметров кластеров грозовых разрядов были использованы данные однопунктовых грозопеленгаторов, установленных в городах Якутске, Нерюнгри и Мирном (радиус регистрации каждого 300 км) за 2006 – 2009 гг. Многопунктовая регистрация представлена данными многопунктовой системы регистрации World Wide Lightning Location Network (WWLLN) за 2009 – 2011 гг. Один из приемных пунктов этой научной сети для регистрации молниевых разрядов расположен в г. Якутске. Система WWLLN полностью покрывает территорию исследуемого региона.

В результате натурального эксперимента на основе модели грозового очага получены новые закономерности. До 50% выделенных модельных кластеров 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.

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 общей территории, занимаемой грозой в рассматриваемые сутки, увеличивается экспоненциально площадь грозовых очагов, без увеличения их количества.

Анализируя встречаемость гроз в зависимости от плотности разрядов внутри грозы, получено, 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  $0,002 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{час}}$ .

Флуктуации год от года достаточно велики: среднее значение плотности грозовых очагов внутри зон регистрации вокруг Якутска в 2009 г. –  $0,1076 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ , в 2010 г. –  $0,0943 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ , в 2011 г. –  $0,2951 \frac{\text{разр}}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$ .

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

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

С увеличением средней площади отдельного грозового очага плотность разрядов в нем падает по степенному закону.

Исследуя форму грозовых ячеек, было установлено, что на территории исследуемого региона контур грозовых ячеек близок к эллипсу. Для вытянутых эллипсоидных ячеек значения больших полуосей модельных эллипсов контуров грозовых ячеек, полученные в результате обработки программой кластеризации массива данных, имеют средние размеры  $19 \pm 0,5$  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.

Таким образом, контур грозových ячеек по форме близок к эллипсу, что экспериментально обосновывает применение эллипсоидной формы, в модели, принятой нами для описания грозových очагов.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что с ростом значения эксцентриситета и, следовательно, повышением вытянутости ячеек увеличивается интенсивность грозových разрядов в этих ячейках. Зависимость интенсивности ячеек от вида контура грозовой ячейки представлена на рисунке 2. Эта зависимость может быть представлена выражением:

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

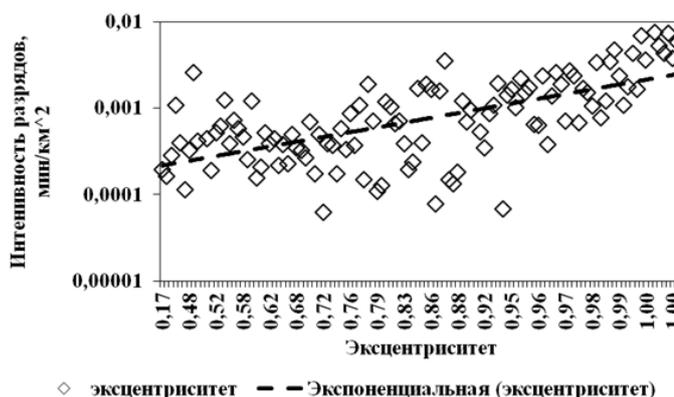


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности ячеек от значений эксцентриситета по данным многопунктовой системы WWLLN за июнь 2001 г

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

Таким образом, установлено, что для гроз, с большой интенсивностью разрядов, показателем мощности грозového объекта может служить эксцентриситет модельного эллипса, ооконтуривающего его. Если эксцентриситет выше приемлемого уровня 0,6, то это свидетельствует о повышенной плотности грозových разрядов внутри грозového объекта и в этом случае необходимо принимать защитные меры.

**Четвертая глава** посвящена разработке практических рекомендаций по применению комплексного метода мониторинга грозовой активности, включающих технологию определения координат грозového разряда на основе двухпунктовой системы грозопеленгации; технологию обработки массива данных грозových разрядов методами двухступенчатого кластерного анализа; технологию оценки риска наступления чрезвычайной ситуации, связанной с грозой. Предложен метод комплексного мониторинга грозовой активности (рисунок 3).

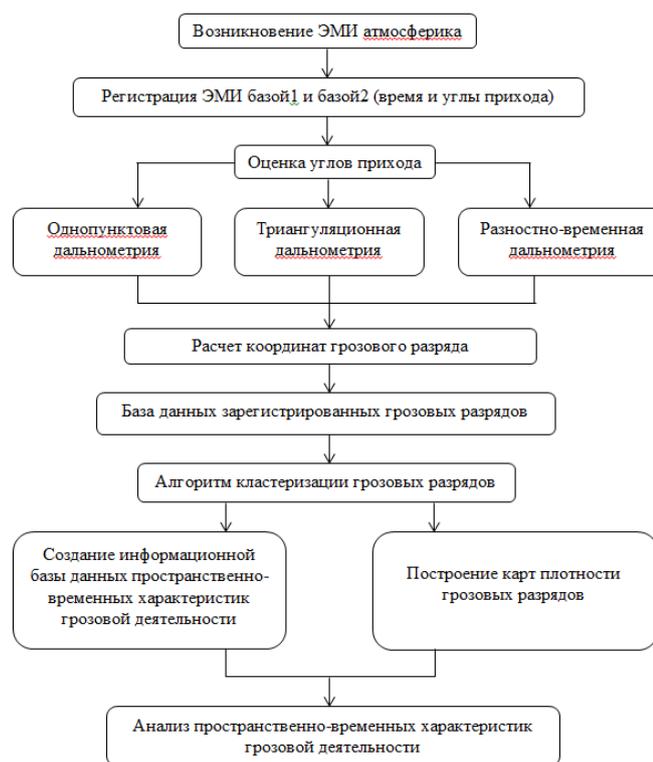


Рисунок 3 – Схема метода комплексного мониторинга грозовой активности

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод местоопределения грозового разряда для двухпунктовой системы гронопеленгации, 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.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### а) публикации в изданиях Web of Science и Scopus:

1. **Shabaganova, S. N.** Characteristics of storm cells from observations in Yakutia / **S. N. Shabaganova**, R. R. Karimov, V. I. Kozlov, V. A. Mullayarov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2012. – Т. 37, № 11-12. – С. 746–751.

2. **Shabaganova, S. N.** Characteristics of thunderstorm cores from observations in Yakutia / V. I. Kozlov, V. A. Mullayarov, **S. N. Shabaganova** // Russian Physics Journal. – 2013. – Т. 56, № 4. – С. 398–404.

### б) статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Шабаганова, С. Н.** 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.

2. **Шабаганова, С. Н.** 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.

3. **Шабаганова, С. Н.** Применение кластерного анализа для выделения грозových очагов / **С. Н. Шабаганова**, В. И. Козлов // Динамика сложных систем - XXI век. – 2010. – № 2. – С. 43–47.

4. **Шабаганова, С. Н.** Характеристики грозových ячеек по наблюдениям в Якутии / **С. Н. Шабаганова**, Р. Р. Каримов, В. И. Козлов, В. А. Муллаяров // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 12. – С. 35–43.

5. **Шабаганова, С. Н.** 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.

6. **Шабаганова, С. Н.** Кластеризация грозových разрядов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2019. – № 1 (69). – С. 58–69.

### в) свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. 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.

2. 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; опубл. 18.11.2010. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 11, С. 9.

3. 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.

**г) материалы конференций:**

1. **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.

2. **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.

3. **Шабаганова, С. Н.** Оценка погрешностей методов наблюдения грозовых 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.

4. **Шабаганова, С. Н.** Суточно-сезонные вариации импульсной составляющей радишумов 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.

5. **Шабаганова, С. Н.** Выделение грозовых очагов на примере данных регистратора LD-250 в Западной Якутии / С. Н. Шабаганова // XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-15: Тез. докл. – Томск, 2009. – С. 40-41.

6. **Шабаганова, С. Н.** 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.

7. **Шабаганова, С.Н.** Характеристики грозовых разрядов в Северо-Восточной Азии / Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р., Тарабукина Л.Д., Шабаганова С.Н. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сборник докладов XVIII Международного симпозиума. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2012. С. D–213-216.

8. **Шабаганова, С.Н.** Инструментальные наблюдения гроз в Якутии в 2009-2011 гг. / Каримов Р.Р., Козлов В. И., Муллаяров В. А., Тарабукина Л.Д., Шабаганова С.Н. // 7 Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. – Санкт-Петербург: Издательство ФГБУ ГГО, 2012. С. 125-126.