На правах рукописи

КУЗЬМИН ВЛАДИМИР АРКАДЬЕВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ И ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ АВИАЦИИ

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нальчик - 2021

Работа выполнена в ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидомет)

Научный руководитель:	**Аджиев Анатолий Хабасович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ»), г.Нальчик
Официальные оппоненты:	**Щукин Георгий Георгиевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБВОУВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», г.Санкт-Петербург
	Шулейкин Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник «Центр инновационных нефтегазовых технологийИнститута проблем нефти и газа РАН», г.Москва
Ведущая организация:	ФГБОУВО «Южный Федеральный университет», г.Ростов-на-Дону

Защита состоится «09» апреля 2021 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д. 327.001.01 при ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Росгидромета по адресу: 360030, КБР, г.Нальчик, пр. Ленина, 2, электронная почта: vgikbr@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2 и на сайте www.vgistikhiya.ru.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук, доцент Н.В. Кондратьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Грозы относятся к числу наиболее опасных явлений погоды. С грозой нередко связано возникновения пожаров, разрушения зданий, повреждения линий электропередач, нарушения движения самолетов и поездов и др. Оперативное определение местоположения грозы, ее интенсивности, направления и скорости перемещения имеет большое практическое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности человека, в частности, для метеообеспечения авиации, молниезащиты энергетических объектов и др. Оперативный мониторинг и прогноз электрической активности конвективных облаков являются актуальными и сложными проблемами в современной физике атмосферы. Важность этих задач обусловлена необходимостью обеспечения безопасности летательных аппаратов и энергетических сооружений от попадания молнии, предупреждения лесных пожаров и ликвидации возможности воздействия тока молнии на электрические сети.

К полетам в условиях грозовой деятельности предъявляются особые требования. При оценке метеорологической обстановки в районах аэродрома и на маршруте полета самолета крайне важно знать характеристики гроз и прогноз текущего её развития (наукастинг) на период до 2 часов.

До сих пор основным источником информации о грозах в России являются визуально-слуховые наблюдения, которые проводятся на метеорологических станциях, входящих в состав служб штормового оповещения. Сам метод наблюдения не дает возможности корректно оценить местоположение разрядов молнии, ее геометрические размеры грозовых явлений, направление и, главное, скорость ее перемещения. Радиус сбора информации о грозах на таких станциях составляет от 10 до 20 км, в зависимости от их местоположения и интенсивности грозовых процессов.

Учитывая недостаточность этих сведений и растущие запросы молниезависимых технологий, авиации, микропроцессорных систем, средств связи и др., в ряде зарубежных стран (США, Финляндия, Германия и др.) предпринимаются попытки формирования климатических характеристик гроз на основе инструментальных наблюдений. В настоящее время за рубежом произошел переход от визуально-слуховых наблюдений за грозами к инструментальному мониторингу на основе пассивных радиотехнических средств.

Локальное электрическое поле приземной атмосферы весьма чувствительно к метеорологическим условиям и существенно меняется при развитии грозовых облаков. Данная особенность может быть использована для решения обратной задачи – диагностики и уточнения грозовой активности в облаках на основе данных электрического поля приземной атмосферы. Однако, для решения такой задачи требуется надежные данные о влиянии различных типов разрядов молний на приземное электрическое поле.

Кроме того, недостаточно исследованным остается воздействие медленно и быстро меняющихся электрических полей на состояние грозовых облаков.

Изложенные факты подтверждают актуальность предложенной темы диссертационной работы и позволяют утверждать, что исследования параметров молнии представляют, как общенаучный, так и прикладной интерес для решения задач по защите самолетов от воздействия электрических процессов в атмосфере.

Объектом диссертационного исследования являются грозовые облака, а также электричество приземной атмосферы.

Предметом исследования являются пространственно-временные закономерности развития электричества приземной атмосферы под воздействием грозовых процессов.

Работа выполнялось в ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» в 2016-2019 годах в соответствии с планами НИОКР и послевузовской подготовки в аспирантуре.

Цель работы - исследование электрических процессов в приземном слое атмосферы при развитии грозовой деятельности, характерных для юга Европейской части России и разработка рекомендаций по защите объектов от воздействия грозовых явлений.

Выделены следующие задачи исследования:

1. Провести комплексные синхронные измерения молниевой активности различных типов и временного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы на репрезентативной территории составных частей Центра геофизического мониторинга ВГИ с помощью грозорегистратораLS8000 и измерителей градиента поля EFM 550.

2. Оценить изменчивость градиента потенциала электрического поля приземной атмосферы под воздействием молниевых разрядов различных типов.

3. Выявить закономерности изменения напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли при различных типах молний и количественных соотношений между различными характеристиками грозовой активности.

4. Получить количественные оценки корреляционных взаимосвязей между молниевыми разрядами различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и значением напряженности электрического поля приземной атмосферы на репрезентативной территории.

5. Определить критические значения градиента потенциала у поверхности земли при разрядах молний различных типов.

6. Разработать рекомендации по обеспечению безопасности объектов при грозах, основанные на измерениях напряженности электрического поля атмосферы и данных о молниевой активности.

Научная новизна диссертационного исследования

Впервые анализируютсяэффекты прямых и обратных взаимосвязей между параметрами разрядов молний и градиентом потенциала (напряженностью поля) приземной атмосферы. В ходе проведенной работы были получены следующие научные результаты:

1. Впервые определены критические значения напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли, при которых наступают условия для развития разрядных явлений в облаках.

2. Выявлены закономерности изменения напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли при различных типах молний и количественных соотношений между различными характеристиками грозовой активности.

3. Впервые получены количественные оценки корреляционных взаимосвязей между молниевыми разрядами различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и значением напряженности электрического поля приземной атмосферы на репрезентативной территории. Получены аналитические уравнения регрессии для количества различных типов молний и напряженности электрического поля атмосферы различной полярности.

4. Разработаны рекомендации по обеспечению безопасности молниезависимых объектов при грозах, основанные на измерениях напряженности электрического поля приземной атмосферы и данных о молниевой активности. Предложен новый подход к совместному использованию данных о молниях различных типов и данных о напряженности электрического поля приземной атмосферы для мониторинга грозовой опасности на территории сосредоточения молниезависимых объектов.

Научная и практическая значимость работы

1. Полученные в работе статистические данные о характеристиках комплексных синхронных измерений молниевых разрядов различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и временного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы на репрезентативной территории могут быть использованы для уточнения электрического строения грозового облако на различных стадиях его развития.

2. Результаты работы могут быть использованы для уточнения сверхкраткосрочных прогнозов (наукастинга) грозовых явлений.

3. Разработанные рекомендации для определения грозоопасности над ограниченной территорией по непосредственным регистрациям нарастания или спада напряженности поля могут быть использованы для обеспечения безопасности самолетов при взлете и посадке в аэропортах и для защиты особо важных объектов от молний.

4. Результаты диссертационного исследования являются методологической основой совместного использования информации о координатах молниевых разрядов и изменением во времени значений напряженности электрического поля. Это позволяет заблаговременно и с большей, чем при использовании данных исключительно грозопеленгационной сети, достоверностью определить возникновение опасного атмосферного явления.

5. Полученные результаты использованы при выполнении НИР в ФГБУ «ВГИ» в рамках госзаданий на 2018 – 2020 годы по Программе «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики».

6. Экспериментальные результаты исследования позволяют расширить и углубить существующие представления о формировании атмосферно-электрических и грозовых процессов.

7. Полученные результаты могут также использоваться в качестве справочных материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Выведены аналитические уравнения распределений значений токов молний различной полярности (отрицательные разряды между облаком и землей, положительные разряды молнии между облаком и

землей, разряды внутри облака). Получены минимальные, максимальные, средние и модальные значения токов наземных молний положительной и отрицательной полярностей.

2. Статистические данные синхронных измерений молниевых разрядов различных типов (облачных и наземных) и напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах. При развитии облака наблюдается скачок напряженности поля, вызванный внутри облачными разрядами молний. При этом знак наведенного облачными разрядами поля может быть как положительным, так и отрицательным. Отношение положительных и отрицательных изменений поля составляет 1,23. Результаты свидетельствуют, что при отсутствии наземных молний облачные разряды в большинстве случаев приводят к увеличению положительного поля. Такое увеличение, как правило, не превышает +4кв/м.

Значительные скачки напряженности поля вызывают наземные разряды молний. Такое увеличение, как правило, может доходить до ± 10кв/м. При наземных разрядах молний отношение положительных и отрицательных изменений поля составляет 0,99. Результаты свидетельствуют, что наземные молнии в равных случаях приводят к увеличению поля как в положительную так в отрицательную полярности.

По сравнению с фоновым полем (значения напряженности электрического поля атмосферы при «хорошей погоде») при грозах напряженность электрического поля атмосферы принимает значения от 200 В/м до ±10000В/м., следовательно, скачок поля может составлять в 50 раз как положительную так в отрицательную полярности. При этом следует отметить, что величина скачков напряженности электрического поля атмосферы зависит также и от интенсивности (частоты) разрядов молний.

3. Количественные оценки корреляционных взаимосвязей между интенсивностью молний различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и значениями напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах в виде линейных выражений. Рассчитанные значения коэффициентов корреляции указанных зависимостей составили 0,8; 0,9 и 0,8 соответственно.

4. Определены критические значения градиента потенциала у поверхности земли при разрядах молний различных типов. Выявлено, что более 70% от общего количества разрядов в облаке происходят при фиксируемых у поверхности земли под облаком абсолютных значениях градиента потенциала электрического поля, превышающих 2 кВ/м. При значениях градиента от – 2 до + 2 кВ/м наблюдаются только менее 20% от общего числа разрядов. В этом диапазоне градиентов разряды на землю, как правило, не отмечаются. Наибольшее количество наземных молний (более 60%) отмечаются при градиенте потенциала электрического поля от – 4 до + 4 кВ/м.

5. Предложена методология оповещения о грозовой опасности, основанная на измерениях напряженности электрического поля атмосферы и данных о молниевой активности. По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развитии разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от -0,2 до + 0,2кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от -0,2кВ/м и менее и при + 0,2кВ/м и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от – 2кВ/м и менее и при +2кВ/м и большее - наземные молнии.

Степень достоверности и апробация полученных результатов

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается строгой постановкой задачи, использованием современных активно-пассивных радиотехнических средств, значительным количеством собранных для анализа данных. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям физики атмосферного и грозового электричества.

Апробация полученных результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях:

1. III Всероссийская конференция и школа для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: ЮФУ, 2016.
2. V Всероссийская научная конференция. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», I Молодежная школа – конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики, радиолокационного и аэрокосмического зондирования природной среды», ВКА им. А.Ф.Можайского, г. С.Петербург, 2018.
3. V Всероссийская научная конференция и школа для молодых ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техносферной безопасности», Таганрог, 5-6 октября 2018 г.

4. Международная конференция «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», Ставрополь, 24-28 сентября 2018 г.

5. VIII Открытая Всероссийская конференция по атмосферному электричеству, Нальчик, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», 2019.

6. Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь», Борок, 25 − 29 сентября 2017 г.

7. На семинарах отдела стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт».

Получены:

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611946 от 13 февраля 2014 г. «Программа сбора, обработки и представления информации, поступающей от сети устройств наземного мониторинга очагов опасных природных явлений «MountainTorrent».

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014612901 от 12 марта 2014 г. «Программа обработки и визуализации результатов измерения напряженности электрического поля атмосферы «Electricfieldstrength»».

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, 4 из которых – в центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Диссертация в целом является результатом самостоятельной работы автора, который обобщил полученные лично им и совместно с научным руководителем результаты. Частично исследования были проведены в Центре геофизического мониторинга ФГБУ «ВГИ». Все выносимые на защиту положения основаны на самостоятельно полученных результатах. Автором разработаны специальные программы обработки выходных данных регистратора EFM 550 и осуществлена государственная регистрация программы для ЭВМ. Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, обосновании выбора расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Кроме того, автор подготовил материалы статей и выступлений, сформулировал основные выводы и заключения по работе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 173 наименований. Объем работы составляет 154 страниц, в том числе 49 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована новизна научной работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных грозовому электричеству. В этом разделе значительное внимание уделено анализу работ, посвященных грозовому электричеству, параметрам молниевых разрядов, методам измерения различных характеристик грозового электричества. Показано, что природа грозового электричества и выявление причин его воздействия на объекты являются фундаментальными для грозового электричества и остаются актуальными на протяжении многих десятков лет.

Проанализированы доступные статистические данные, касающиеся воздействия грозовых разрядов на воздушное судно.

Выполнен анализ существующих методов и средств контроля грозовых явлений. Выделены основные тенденции в разработке пассивных средств обнаружения и локации гроз, используемых как в научных целях, так и для многочисленных приложений. Показано, что наиболее перспективными техническими средствами для мониторинга гроз являются многопунктные системы определения местоположения разрядов молний. Приведена краткая информацияо тактико-технических характеристиках систем грозопеленгации: зарубежные – «TOA», «VAISALA», «EN» и отечественные «Вериа - МР», «Алвес».

Внедрение в практику гидрометеорологического обеспечения новых технологий дистанционного наблюдения гроз в России начаты в 2008 году и в настоящее время эти работы продолжаются. На основе проведенного обзора сделан вывод, что определение грозоопасности над ограниченной территорией до появления первых молниевых разрядов является актуальной задачей и требует применениясредств, позволяющих непосредственно регистрировать нарастающую электрическую активность облако. Для этого в работе предлагается использовать систему контроля электрического состояния приземной

атмосферы путем измерения напряженности электрического поля синхронно с регистрацией координат и времени разрядов молний на контролируемой территории.

По результатам анализа состояния проблемы мониторинга параметров молний и их воздействия на летательные аппараты и молниезависимые объекты сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлено описание использованного в работе экспериментального оборудования и методики исследования физико-статистических параметров молний и электрического поля атмосферы. Для проведения комплексных синхронных измерений молниевых разрядов различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и временного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы на репрезентативной территории были использованы аппаратно-программные комплексы ФГБУ «ВГИ», включающие грозорегистраторLS8000 и измерители напряженности электрического поля атмосферы EFM550 (АПК). Данные системы позволяют получать полную информацию об электрических явлениях в атмосфере, включая местоположение разрядов молнии, их классификацию на наземные положительные, наземные отрицательные, облачные, а также суточные вариации напряженности электрического поля атмосферы.

Грозопеленгационная сеть LS8000, установленная на Северном Кавказе в 2008 году, состоит из восьми грозопеленгаторов и центрального пункта приема и обработки информации. Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика — низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Низкочастотный датчик фиксирует, в основном, молниевые разряды типа «облако–земля». Высокочастотный датчик фиксирует молниевые разряды только типа «облако–облако». Зоны обзора для разных типов молниевых разрядов различные.

Для молниевых разрядов «облако–земля» радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов «облако–облако» — 325 км. Зона обзора системы перекрывает территории юга европейской части России и республик Закавказья. По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральные процессоры (CP8000), расположенные в центре приема и обработки информации, формируют до 25 параметров по каждому молниевому разряду.

В частности для молниевых разрядов «облако–земля»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд; координаты разряда; сила и полярность тока в канале разряда; классификация разрядов на положительные и отрицательные; время роста сигнала до пикового значения; время спада сигнала от пикового значения до нуля и др. Для молниевых разрядов «облако–облако»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд и координаты разряда.

По этим измерениям достаточно точно определяется:

– начало, окончание и продолжительность грозовых явлений на юге европейской части России, а также динамику их развития и траекторию перемещения;

– пространственное местоположение разрядов молний, их классификацию по типам и полярностям (знак переносимого молнией на землю электрического заряда);

– значения амплитуды токов в каналах наземных разрядов молний и временные характеристики нарастания и спада импульсов токов.

Система позволяет проводить автоматическую регистрацию указанной информации, ее архивирование, а также визуализацию информации в различных форматах: табличных данных; точек координат молний, наложенных на карты местности; в виде цветовой индикации на различных картосхемах и др.

Использование грозорегистратораLS8000 в настоящей работе позволило за сравнительно короткий срок (2 года) собрать значительный объем грозоразрядной информации (более 30 000) для анализа.

Объектом диссертационного исследования также является напряженность электрического поля приземной атмосферы. В атмосфере всегда присутствует вертикальное электрическое поле. При ясной погоде это поле слабое и составляет примерно от 0 до +200 вольт на метр (В/м). Такое поле принято считать положительным, и оно всегда направлено к земле.

Для регистрации значения напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах и при их отсутствии был использован аппаратно-программный комплекс EFM550 ФГБУ «ВГИ». Данная аппаратура производит измерение значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 Гц, т.е. каждые 0,5 секунды. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, составляют ±10 000 В/м. Репрезентативной территорией сбора информации является круг радиусом не менее 15 км. Измеренные значения сохраняются на жестком диске компьютера. По этим данным можно изучать суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы с помощью программного обеспечения аппаратно-программного комплекса EFM550. В

состав АПК «ВГИ» для мониторинга напряженности поля входит 4 наземных пункта с комплектом быстродействующих компьютеров с программным обеспечением, разработанным с участием автора. Пункты расположены: на здании ВГИ, на научно-исследовательской базе ВГИ «Кызбурун», на станции СКВС «Урвань» и на метеостанции «Пик Чегет». Система совместных регистраций разрядов молний и напряженности поля построена по схеме с радиальными связями. Информация с датчиков в режиме реального времени передавались по радиоканалу в центр обработки данных.

На рисунке 1 показаны совмещенные данные напряженности электрического поля атмосферы с данными количества молниевых разрядов над выбранной территорией, для дней с грозами. На рисунке представлены значения напряженности электрического поля атмосферы, соответствующая ось с левой стороны. В виде гистограммных столбиков показаны количества молниевых разрядов над выбранной территорией, соответствующая ось с правой стороны. Как видно из рисунка 1, имеют место резкие скачки напряженности электрического поля приземной атмосферы под воздействием разрядов молний.

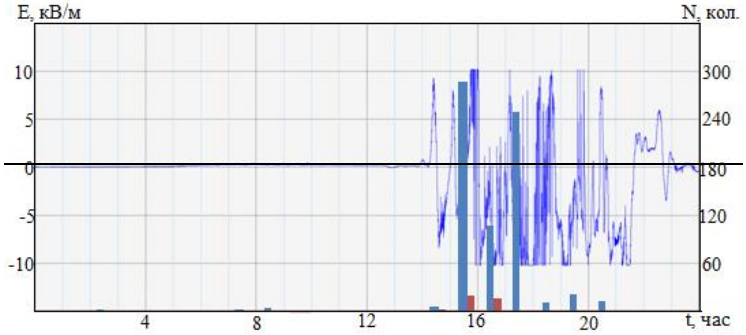


Рисунок 1 - Ход напряженности электрического поля и количества разрядов «облако- облако» и «облако-земля» (сумма положительных и отрицательных) от времени, за 6 мая 2013 года (——-количество разрядов «облако-облако», ——-количество разрядов «облако-земля»).

В работе также использована разработанная с участием авторапрограмма сбора, обработки и представления информации, поступающей от сети устройств наземного мониторинга очагов опасных природных явлений«MountainTorrent» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611946 от 13 февраля 2014 г).

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований физико-статистических параметров молний и приземного электрического поля.

Собранная информация показывает, что для юга Европейской части России характерно значительное преобладание облачных (межоблачных) разрядов молний, которые составляют до 87% от общего числа регистрируемых грозорегистратором LS8000 молний. При этом доля положительных разрядов от общего числа наземных молний составляет около 23%, что соответствует принятым значениям для средних широт (20%) подтверждает ранее полученные результаты в ФГБУ «ВГИ» (2016 г.). Статистические распределения токов положительных разрядов молний $F_+(J)$ и отрицательных разрядов молнии $F_-(J)$ и линии тренда (сплошная линия) по Северному Кавказу представлены на рисунках 2 и 3.

За период выполнения диссертационной работы удалось получить следующие статистические характеристики разрядов молнии:

Положительные разряды: Объем исследуемой выборки 31376 разрядов молний. На основе экспериментальных данных в работе получено распределение значений тока наземных молний положительной полярности в виде выражения:

$$F_+(J)=1{,}01\cdot10^{-9}J^6-3{,}226\cdot10^{-6}J^5+1{,}122\cdot10^{-3}J^4+11{,}3J^2-396{,}5J+5{,}702\cdot10^3 \quad (1)$$

Для выражения (1) коэффициент детерминации R^2 равен 0,9987. Самый слабый и частый (2688 случая) импульс измеренной силы тока составляет 10 kA. Самый сильный 311 kA. Мода равна 10 kA, медиана вариант, расположенная в середине нашего упорядоченного вариационного ряда, делящая его на две равные части, равна 17 kA, среднее значение силы тока соответствует 22,9 kA. Дисперсия исследуемых сигналов – степень рассеяния вокруг среднего их значения - равна 304,05 $(kA)^2$, а среднеквадратическое отклонение 17,458 kA. Сумма всех положительных сигналов выборки составляет 722901 kA. Размах выборки, т.е. разница между максимальным и минимальным полученными сигналами, равен 301 kA.

Отрицательные разряды: Объем исследуемой выборки составляет 31534 регистраций. На основе экспериментальных данных распределение значений тока наземных молний отрицательной полярности представлено в виде выражения:

$$F_{-}(J)=-2{,}3\cdot10^{-6}J^{6}+6{,}2\cdot10^{-4}J^{5}-0{,}066J^{4}+3{,}43J^{3}-90J^{2}+1{,}02\cdot10^{3}J-2{,}21\cdot10^{3} \quad (2)$$

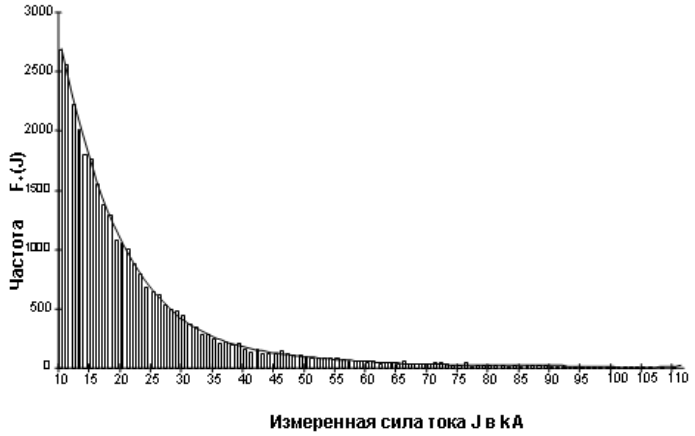


Рисунок 2 - Распределение значений токов молнии положительной полярности

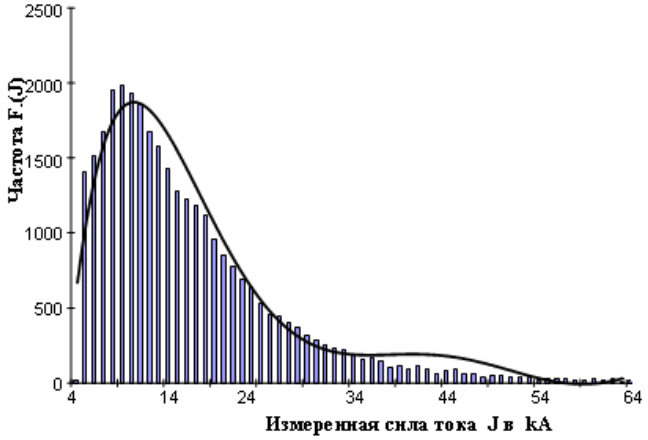


Рисунок 3 - Распределение значений токов молнии отрицательной полярности

Для выражения (2) коэффициент детерминации R^2 равен 0,9191. Самый слабый импульс измеренной силы тока составляет 4 kA. Самый сильный 210 kA. Мода равна 9 kA, медиана вариант, расположенная в середине упорядоченного вариационного ряда, делящая его на две равные части равна 14 kA, среднее значение силы тока соответствует 16,8019 kA. Дисперсия исследуемых сигналов – степень рассеяния вокруг среднего их значения равна 140,648 $(kA)^2$, а среднеквадратическое отклонение 11,595 kA. Сумма всех отрицательных сигналов выборки составляет -530287 kA. Размах выборки – разница между полученными максимальным и минимальным сигналами равен 206kA.

Важной климатической характеристикой грозовых явлений является их продолжительность. Количество часов грозовой активности в целом на территории юга европейской части России составило 5000 часов. Благодаря возможностям используемой аппаратуры по локализации измерений на малой (ограниченной) территории проведена оценка количества молний за грозовой процесс и длительность грозовой активности.

В среднем молниевая активность грозового дня продолжается в течение 240 минут. Продолжительность грозового цикла одной облачной ячейки в среднем составляет около 31,2 минут (стандартное отклонение ±20,2 мин), генерируют при этом около 235 молний (стандартное отклонение ±392).

Прослеживается взаимосвязь между продолжительностью грозовых явлений в отдельной грозовой ячейке (облака) и интенсивностью молниевых разрядов. Используя полученные данные, по более 400

случаям наблюдений за естественно эволюционирующими облачными ячейками соотношение между молниевой активностью (числа разрядов в минуту) и продолжительностью грозовых явлений формализованы выражениями, которые применимы для территории юга Европейской части России:

$$T=0{,}965F+20{,}8 \text{ (мин), при } F>0, \quad (3)$$
$$F = 1{,}04\,T - 21{,}6 \text{ (молн/мин), при } T>20{,}8, \quad (4)$$

где T – продолжительность грозы в мин., F – средняя частота разрядов в облаке мин$^{-1}$. Коэффициенты в выражениях (3) и (4) имеют размерности: мин$^{-1}$·мин и мин$^{-1}$·мин$^{-1}$, соответственно.

Выражения (3) и (4) можно использовать при теоретических расчетах процессов облако - и осадкообразованиях, а также при соответствующих климатических оценках территорий.

Отметим, что грозовая активность на юге европейской части России выше, чем на севере. Так для площади, принятой на метеостанциях (круг радиусом 10…15 км) число дней с грозой в году на юге в районе г.Сочи достигает 70, а в северной части территории (в районе г.Ростов-на-Дону) - 23. Удельная поражаемость поверхности земли молниями на юге составляет 5 на 1 км^2, а на севере около 2 на 1 км^2.

Полученные данные важны при метеорологической оценке территорий в районах аэродромов и на маршруте полетов. Их ценность заключается в том, что они получены прямыми методами.

В работе проведены совместные исследования вариаций напряженности электрического поля атмосферы при грозах и параметров разрядов молний, в репрезентативной зоне регистрации датчиков электрического поля EFM 550. В таблице 1 приведены характерные данные за 12 дней исследований, включающих 10 дней с грозой и 2 дня с «хорошей погодой» в зоне действия измерителя (территория ограничена окружностью радиусом 10 км вокруг точки установки EFM 550). Из 10 дней с грозой 4 дня были грозы только с облачными разрядами (без наземных молний). 6 дней были с грозами, когда отмечались и облачные и наземные молниевые разряды разных полярностей. Всего за рассматриваемые дни зарегистрированы около 3928 разрядов. Из них «VHF»- 3610, «LF+» - 64, «LF-» - 254. Реакциями во временном ходе напряженности поля на молниевые разряды являются резкие скачки от нормального значения +130 В/м до значений от -10 кВ/м до +10 кВ/м после каждого разряда. В таблице приведены средние значения за период наблюдения явления.

Как видно из таблицы 1, при разрядах облако – земля происходят рост приземного поля до значений, как правило, превышающих ±4 кВ/м. С ростом частоты молний происходит увеличение напряженности электрического поля.

Облачные разряды фиксируются при напряженностях поля, превышающих ± 0,5кВ/м. Рост их количества также приводит к увеличению абсолютного значения величины поля.

Таблица 1 – Количество молниевых разрядов различных типов при грозах и средние значения напряженности электрического поля атмосферы при их развитии

№ п/п	E, кВ/м	N, «облако- земля»		N, внутриоблачные «VHF»
		«LF-»	«LF+»	
1	-10…-8	74	24	624
2	-8…-6	32	12	508
3	-6…-4	22	2	322
4	-4…-2	0	0	230
5	-2…-0,5	0	0	28
6	-0,5…0	0	0	0
7	0…+0,5	0	0	0
8	+0,5…+2	0	0	58
9	+2…+4	0	0	260
10	+4…+6	8	4	352
11	+6…+8	36	16	542
12	+8…+10	82	18	686
Всего		254	64	3610

Проведенные эксперименты по мониторингу электрического поля приземной атмосферы при грозовой активности в облаках, находящихся на различных стадиях развития над точкой контроля напряженности электрического поля, показали:

1. При развитии облака наблюдается скачок напряженности поля, вызванный внутри облачными разрядами молний. При этом знак наведенного облачными разрядами поля может быть как положительным, так и отрицательным. Отношение положительных к отрицательным изменениям поля составляет 1,23. Результаты свидетельствуют, что при отсутствии наземных молний облачные разряды в большинстве случаев приводят к увеличению положительного поля. Такое увеличение, как правило, не превышает +4кв/м.

2. Значительные скачки напряженности поля вызывают наземные разряды молний. Такое увеличение, как правило, может доходить до ± 10кв/м. При наземных разрядах молний отношение положительных к отрицательным изменений поля составляет 0,99. Результаты свидетельствуют, что наземные молнии в равных случаях приводят к увеличению поля как в положительную, так в отрицательную полярности.

3. По сравнению с фоновым полем (значения напряженности электрического поля атмосферы при «хорошей погоде») при грозах напряженности электрического поля атмосферы принимает значения от 200 В/м до ±10000В/м., следовательно, скачок поля может составлять в 50 раз как положительную, так в отрицательную полярности. При этом следует отметить, что величина скачков напряженности электрического поля атмосферы зависит также и от интенсивности (частоты) разрядов молний.

Таким образом, можно констатировать, что впервые получены значения диапазона скачков напряженности поля, вызванные внутриоблачными разрядами молний и наземными молниями различной полярности. При этом знак скачков поля практически не зависит от типа наземных молний.

Нами выполнены количественные оценки корреляционных взаимосвязей интенсивности молний различных типов (облачныхN, наземных положительных N^+ и наземных отрицательныхN^-) и значений напряженности поля приземной атмосферы (E – значения всего ряда напряженности, /E/ - абсолютное значение напряженности, E_1 – значения поля отрицательной напряженности, E_2 – значения поля положительной напряженности) при грозах.

Для построения моделей указанных взаимосвязей были исследованы следующие виды зависимостей:

- линейная, степенная, полулогарифмическая, гиперболическая, экспоненциальная и некоторые их комбинации. Для построения модели нами отобраны линейные функции вида:

$$Y= b_0 + b_1x+ e = y + e, \qquad (5)$$

где Y,x - реальные данные; y - модель (строгая функциональная зависимость); e - остатки (отклонения наблюдаемых значений от теоретически ожидаемых). Модель обладает наибольшей простотой , можно интерпретировать результаты.

Были рассчитаны коэффициенты корреляции по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y},$$

где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ - средние значения переменных x_i *и* y_iсоответственно; σ_x и σ_y - стандартные отклонения переменных x и y; n- количество наблюдений. Полученные коэффициенты корреляции представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики корреляции между напряженностью поля E; количеством молний различных типов.

		E	N+	N^-	N
E	Коэффициент корреляции Пирсона, r	1,000	-0,168	0,203	0,019
	Стандартная ошибка, δ	0,0	0,407	0,368	0,328
	Значимость Sig.	0,0	0,601	0,527	0,953
	Количество случаев, n	12	12	12	12

Были получены высокие и статистически значимые коэффициенты корреляции, следовательно, возможно построение регрессионной модели, отражающей реальные закономерности возникновения различных значений напряженности поля от типов молний. Параметры регрессионной модели вычисляются известным методом наименьших квадратов.

Важной предпосылкой построения качественной регрессионной модели по методу наименьших квадратов является независимость значений случайных отклонений от значений отклонений во всех

других наблюдениях. Остатки должны появляться случайно, не систематически. Критерий Дарбина-Уотсона (DW) позволяет вычислить автокорреляцию остатков по формуле.

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^{n}(e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{n} e_t^2} \qquad (6)$$

Можно считать, что автокорреляция остатков отсутствует, если 1,3 < DW < 2,5. Еще один показатель, характеризующий качество модели- коэффициент R-квадрат (R^2) или коэффициент детерминации, показывающий, какая доля совокупной вариации в зависимой переменной описывается выбранным набором независимых переменных.

Получены уравнения линейной регрессии, связывающие количество положительных, отрицательных молний «облако-земля» и облачных молний с *отрицательной* напряженностью (градиент потенциала у поверхности земли) в виде:

$$N^+(E^-) = -9\ E^- - 15{,}64 \qquad (7)$$
$$N^-(E^-) = -18\ E^- - 26{,}8 \qquad (8)$$
$$N(E^-) = -140\ E^- - 58{,}6 \qquad (9)$$

Качество модели оценивается коэффициентом детерминации R^2 и коэффициентом Дарбина-Уотсона DW (таблица 3), из которых следует, что полученные модели объясняют от 76,9% до 97,3% дисперсии и автокорреляция остатков отсутствует.

При 95%-ном доверительном интервале среднее значение искомой величины лежит в интервале ±2δ. И из уравнений 7 – 9 следует, что увеличение отрицательной напряженности на 1 кВ/м обусловлено ростом количества положительных молний «о-з» на 9 (± 4 молнии), или если количество отрицательных молний «о-з» увеличивается на 18 (± 6 молний), или количество облачных молний возрастает на 140 (± 24 молнии).

Коэффициент детерминации R^2 имеет максимальное значение для третьего случая (облачные молнии), регрессионная модель объясняет 97,3% данных. Критерий Дарбина-Уотсона DW=2,269 показывает отсутствие автокорреляции между остатками. Регрессионная модель описывает количество облачных молний наиболее точно.

Аналогичные исследования проведены и для *положительной* напряженности (градиент положительного потенциала у поверхности земли) и количеству молний различных типов. Коэффициенты регрессионной модели с оценками качества модели приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Коэффициенты регрессионной модели для положительной напряженности E_2.

nn	Напряженность E_2	Нестандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка, δ	Коэффициент корреляции, r	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий DW
1	Константа, b_0	-11,9	10	0,856	0,733	1,249
	N^+2, b_1	6	2			
2	Константа, b_0	-37,5	21,6	0,950	0,903	1,130
	N^- 2, b_1	25	4			
3	Константа, b_0	1,4	33,8	0,995	0,991	2,543
	N2, b_1	134	6			

Получены следующие уравнения регрессии для количества различных типов молний и *положительной* напряженности (градиента потенциала у поверхности земли) в виде:

$$N^+(E^+) = 6\ E^+ - 11{,}9 \qquad (10)$$
$$N^-(E^+) = 25\ E^+ - 37{,}5 \qquad (11)$$
$$N(E^+) = 134\ E^+ + 1{,}4 \qquad (12)$$

Из уравнений 10-12 следует, что увеличение положительной напряженности на 1 кВ/м обусловлено ростом количества положительных молний на 6(± 4 молнии) или если количество отрицательных молний увеличивается на 25 (± 8 молний), или количество облачных молний увеличивается на 134 (± 12 молний).

Из регрессионных уравнений 7 -12, полученных для двух рядов напряженности (*положительной* и *отрицательной*), можно заметить, что изменения количества молний всех типов связаны только с абсолютной величиной напряженности поля, и не зависят от знака напряженности. Поэтому возможно объединение положительных и отрицательных величин напряженности по абсолютной величине (|E|) и получение корреляционной зависимости общего количества молний и абсолютной величины напряженности (рисунок 4, таблица 4).

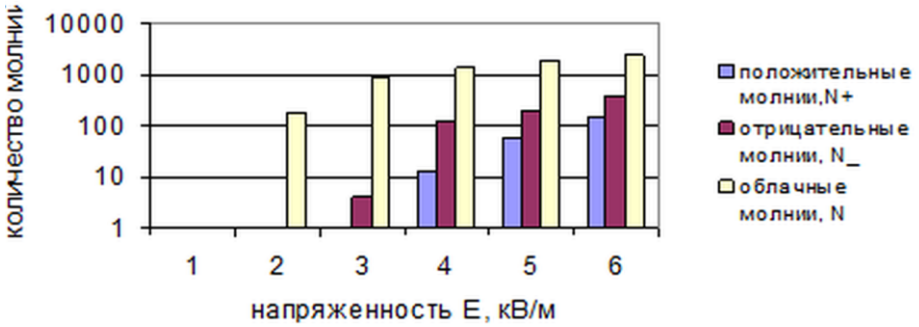


Рисунок 4 – Связь между количеством молний различных типов и абсолютной величиной напряженности электрического поля

Таблица 4 - Коэффициенты регрессионной модели для абсолютной напряженности |E|.

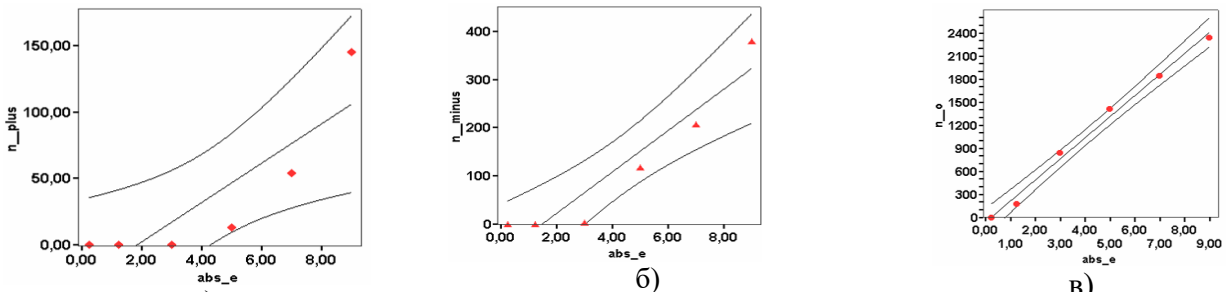
nn	Напряженность |E|	Нестандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка, δ	коэффициент Корреляции, r	Коэффициент Детерминации, R^2	Критерий DW
1	Константа, b_0	-27,5	22,2	0,868	0,754	1,239
	N+, b_1	15	4			
2	Константа, b_0	-64,3	37,9	0,899	0,873	1,286
	N^-, b_1	43	7			
3	Константа, b_0	-57,3	63,8	0,996	0,992	1,823
	N, b_1	274	12			

Получены выражения, связывающие напряженность |E| с количеством положительных молний «облако-земля» N^+;с количеством отрицательных молний «облако-земля» N^- и с количеством облачных молний N.

$$N^+ = 15\,|E| - 27{,}5 \quad (13)$$
$$N^- = 43\,|E| - 27{,}5 \quad (14)$$
$$N = 274|E| - 57{,}3 \quad (15)$$

Изменение абсолютных значений напряженности поля отколичества молний с линейным трендом и 95%-ми доверительными границами представлены на рисунке 5.

Из рассмотренных взаимосвязей наиболее тесную связь имеет место между облачными молниями и абсолютным значением напряженности поля приземной атмосферы (рисунок 5в).



а) б) в)

Рисунок 5 – Связь между количествами молний с линейным трендом и 95% доверительными границами: а - положительные молнии «облако-земля», б - отрицательные молнии «облако-земля», в – облачные молнии и абсолютной величины напряженности -|E|

Из уравнений регрессии 13-15 следует, что увеличение абсолютной величины напряженности (градиента потенциала у поверхности земли) на 1 кВ/м обусловлено ростом количества облачных молний от 250 до 298 (274± 2δ), или количество отрицательных молний от 29 до 57 (43 $\pm 2\delta$), или положительных молний от 7 до 23 (15 $\pm 2\delta$) при 95%-ном доверительном интервале.

Полученные выражения представляют важную информацию для параметризации конвективных облаков и их можно использовать для численных расчетов при моделировании процессов облако – и осадкообразования с учетом электрических факторов.

Особый интерес к характеристикам молнии (значениям тока молнии и времени их развития) обусловлен проблемами разработки эффективных средств молниезащиты различных объектов, а также технических средств обнаружения их местоположения. Особенно актуальна оценка грозоопасности над территорией аэродрома, так как при осуществлении наиболее ответственных маневров – взлета и посадки возможность обойти грозоопасное облако у экипажа отсутствует.

Для решения указанной проблемы в службах обеспечения безопасности полетов используют либо радиолокаторы либо грозорегистраторы, однако с их помощью регистрируются только разряды молнии, или зоны повышенного радиоэхо, что лишь косвенно позволяет судить о потенциональнойгрозоопасности территории аэродрома. Исходя из этого, в разделе 3.3 диссертации рассмотрено воздействие разрядов молнии, с полученными характеристиками на электротехнический комплекс самолета.

При попадании молнии в самолет имеет место протекание тока вдоль фюзеляжа и других его частей. Это приводит к возникновению вокруг самолета сильного электромагнитного поля, напряженность которого приближенно вычисляется по формуле:

$$H_м(t) = \frac{I_м(t)}{2\pi r_ф}, \tag{16}$$

где $I_м$ – максимальный ток молнии, протекающий по фюзеляжу самолета, $r_ф$ – эффективный радиус фюзеляжа самолета.

Возникшее под действием молнии, магнитное поле создает электродвижущая сила (ЭДС) в кабелях, расположенных в в крыльях самолета. Эквивалентная схема воздействия такой электрической цепи представлена на рисунке 6.

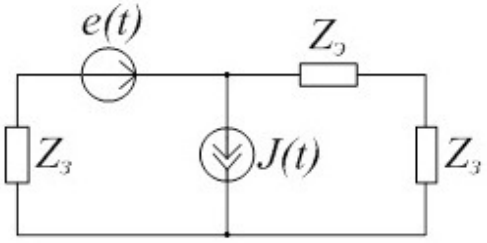


Рисунок 6 - Эквивалентная схема воздействия электрического и магнитного полей на экран кабеля в крыле самолета: *e(t)* –ЭДС, наводимая на экране кабеля под воздействием магнитного поля тока молнии; $Z_э$ - сопротивление экрана кабеля; $Z_з$ - сопротивление металлизации экрана кабеля; *J(t)* - источник тока, эквивалентный воздействию электрического поля на экран кабеля.

Напряжение тока, наводимое на кабель (экраны кабеля), вычисляется по формуле:

$$U(t) = 2\mu_0 lh \frac{dH(t)}{dt}, \tag{17}$$

где *l* – длина кабеля в крыле самолета, *h* – среднее расстояние между экраном кабеля и конструкционными металлическими элементами крыла.

Мгновенная напряженность магнитного поля тока молнии и электрического поля разряда молнии в зависимости от времени равна:

$$H(t) = H_{mcp}(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \quad (18)$$

где α_1, α_2– численные коэффициенты, t – время.

Среднее амплитудное значение напряженности магнитного поля тока молнии вычисляется по формуле:

$$H_{mcp} = \frac{1}{l}\int_0^l \frac{I_{max}}{2\pi(r_\phi + l)} dl \quad (19)$$

Величину тока, эквивалентного воздействию электрического поля на экран кабеля определяют по формуле:

$$J(t) = \frac{2\pi\varepsilon_0 lh}{\ln(2h/r)} \cdot \frac{dE(t)}{dt}, \quad (21)$$

где r – радиус экрана провода.

Имеется аналитическое решение для распределения тока, инициированного разрядом молнии в оболочке самолета в виде эллиптического сечения (Э.М. Базелян).

Форма крыла и фюзеляжа современного авиалайнера далека от идеально круглой. Тем самым распределение импульсного тока молнии становится неравномерным. В наибольшей степени неравномерность проявляется в обшивке крыла и хвостового оперения, а также в местах контакта канала молнии с внешней поверхностью его обшивки. Приближенную количественную оценку можно выполнить, представив поперечное сечение крыла в виде эллипсоида вращения, для которого существует точное аналитическое решение:

$$J(x) = \frac{I_M}{2\pi\sqrt{a^2 + x^2(1 - b^2/a^2)}} \quad (22)$$

Здесь: $I_м$ – ток молнии, вошедший в самолет, J(x) – наводимый молнией ток на единицу длины, a - большая иb – малая полуоси эллипса, x – расстояние от центра эллипсоида вдоль его большой оси. Максимальная погонная плотность тока характерна для вершины эллипсоида с малым радиусом кривизны, где она превышает минимальную плотность в плоской части обшивки в $J_{max}/J_{min}=a/b$ раз.

Соответственно меняются и перенапряжения на изоляции внутреннего проводника относительно обшивки. Они могут многократно возрастать в случае прокладки жгута в месте максимальной крутизны обшивки, например в крыле самолета, где $a/b>100$.

Разность потенциалов U_{12} между точками 1 и 2, находящимися на расстоянииlна фюзеляже самолета можно определить по формуле (23). Невзирая на однородность оболочки по толщине и материалу стенки, погонные плотности импульсного тока в точках 1 и 2 принципиально различны. Отношение их величин равно отношению осей эллипса a/b, на которых они размещены. В результате для сильно вытянутой оболочки плотности тока могут отличаться в пределах порядка величины и даже больше. Столь же различными окажутся и напряжения между проводниками и оболочкой в точках 1 и 2, определяемые выражением:

$$U_{12} = R_0 l I_м (1 - b/a), \quad (23)$$

Как видно из формулы (23) при $b=a$ значение $U_{12}=0$. Это означает, что для круглых участков возникновение больших потенциалов маловероятно. Его значение увеличивается с увеличением отношения полуосей, т.е. на крыльях самолета. В таблице 5 приведены расчетные значения электромагнитных помех молний, формируемые молниями при различных характеристиках самолета. Для расчетов значения токов молний взяты из полученных в работе данных.

Таблица 5 - Расчетные значения электромагнитных помех, формируемых молниями при различных характеристиках самолета

$I_м$,кА	$r_ф$, м	*b*, м	*a*,м	$H_м$,А/м	*J*(x),А/м	*l, м*	x, м	U_{12}, В
10	1	1	0,5	1,6	0,8	1	2	0,05
50	1	1	0,5	7,9	4,0	1	2	0,25
100	2	2	1	7,9	6,1	5	2	2,50
100	3	3	1	5,3	4,5	10	2	5,0
200	3	3	1	10,6	9,0	10	2	10,0
200	5	3	0,5	6,4	7,6	20	3	20,0
250	6	3	0,05	6,6	9,5	10	3	25,0

При расчете U_{12} по формуле (23) значение сопротивления фюзеляжа R_0 принято равным 10^{-5} ом/м. Как видно из таблицы 5, большинство разрядов молний (более 70%), токи которых варьируют от 10 до 50 кА, индуцируют потенциал от 0,05 В до 0,25 В. Такие напряжения в конструкции самолета не представляют серьезной опасности. Однако, токи молнии порядка 100 кА ….250 кА будут представлять серьезную опасность для элементов электроники самолета. При этом следует отметить, что с увеличением искривления фюзеляжа, крыльев, хвостовой части, когда $2<a/b<100$, наводимый молнией ток на единицу длины -*J*(x) превышает 4 кА/м, что является серьезной опасностью и для корпуса самолета.

Изложенное свидетельствует, что при ударе молнии в летательный аппарат или при разряде молнии вблизи него в системе в кабелях, расположенных в крыльях самолета, наводится ЭДС. Согласно приведенным выкладкам наводимое молнией ЭДС прямо пропорционально значениям тока молнии, геометрическим размерам самолета и обратно пропорционально времени разряда.

Следует отметить, что сопротивление экрана провода по постоянному току,сопротивление металлизации экрана кабеля и индуктивность экрана кабеля являются факторами, снижающими воздействие молниевого разряда на летательный аппарат.

Глава 4 посвящена разработке рекомендации по применению грозоразрядной информации и характеристик приземного электрического поля атмосферы для мониторинга грозовых явлений на территории расположения молниезависимых объектов.

Сформулирована методология предупреждения грозовой опасности на основе мониторинга указанных характеристик в двух зонах. Методпредполагает выделение двух концентрических зон у географической точки, именуемой «Точка Интереса» (PI). Первая зона, которая окружает PI, называется «Контролируемая зона» (рисунок 7).

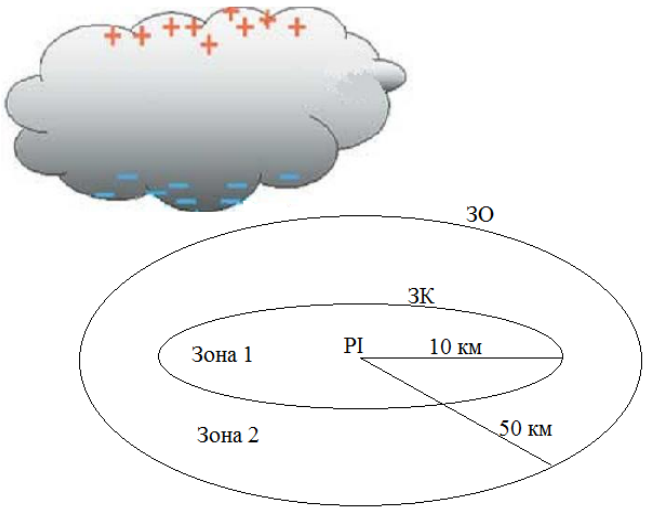


Рисунок 7 - Двухзонный мониторинг грозовой опасности. PI - точка Интереса; ЗК - Зона Касания; ЗО – границы зоны ответственности.

На территории этой зоны сосредоточены высоко уязвимые любым разрядом молнии объекты, в частности, система посадки самолетов, хранилища топлива и др. Примерами такой зоны являются

аэропорт, ракетно – пусковой комплекс, крупный нефтеналивной танкер и др. Второй район или «Зона предупреждения» окружает Зону контроля.

Суть алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности на основе только данных грозопеленгационной сети состоит в формировании предупреждающего сигнала при условии обнаружения молниевых разрядов (МР) в областях предупреждения или контроля. Прекращение сигнала предлагается через 30 мин после регистрации последнего МР в данных областях.

Анализ эффективности алгоритма автоматического предупреждения на основе только данных грозопеленгационной сети производился исходя из трех вариантов развития событий:

1) МР обнаружен в области предупреждения, и в течение действия предупреждающего сигнала зафиксирован, по крайней мере, один МР в контролируемой области (ЗК);

2) МР обнаружен в области предупреждения (ЗП), и в течение времени действия предупреждающего сигнала не зафиксировано МР в контролируемой области;

3) первым обнаружен МР в контролируемой области при отсутствии сигнала предупреждения, т.е. ранее не было зафиксировано МР в области предупреждения.

Если наблюдается первый вариант, рассчитывается время предупреждения (интервал времени между началом оповещения о грозоопасности и первым МР в контролируемой области). При превышении времени предупреждения в 10 мин фиксируется факт корректного предупреждения. Значение 10 мин выбрано исходя из скорости движения грозовых облаков и возможности принятия оперативных решений. Если время предупреждения меньше 10 мин, фиксируется факт отсутствия заблаговременного предупреждения. При развитии второго варианта отмечается факт ложного предупреждения. В случае образования кучево-дождевых облаков (Cb) и их развития до грозовой стадии непосредственно над контролируемой областью может наблюдаться третий вариант, при котором первый МР обнаружен в области контроля. При этом фиксируется факт отсутствия заблаговременного предупреждения.

Определение частоты корректного предупреждения осуществляется из отношения числа случаев корректного предупреждения к числу случаев предупреждения с МР в контролируемой области:

$$P = S/C\ , \tag{24}$$

где S – число случаев корректного предупреждения, C – число случаев предупреждения с МР в контролируемой области.

Частота пропуска опасного явления определяется из выражения:

$$F = 1 - P \text{ либо } F = (C - S)/C \tag{25}$$

Частота ложных срабатываний связана с частотой корректного предупреждения выражением:

$$R = A/(A + S), \tag{26}$$

где A – число случаев ложного предупреждения.

Расчет статистических вероятностей на примере данных о координатах МР за период с 01.08.2016 г. по 01.10.2017 г относительно точки расположения ФГБУ «ВГИ» показан в таблице 6. Всего за данный период было отмечено 38 случаев грозовой активности в контролируемой области (таблица 6). Число предупреждений о грозовой опасности несколько превышает число случаев предупреждения с МР в контролируемой области (C), что говорит о наличии ложных срабатываний (A).

Таблица 6 - Результаты работы алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности с применением данных грозопеленгационной сети

Интервал наблюдений	Число предупреждений	МР в контролируемой области без предупреждения	C	S	A
Август (2016)	15	1	11	10	5
Май (2017)	6	0	2	2	4
Июнь (2017)	18	2	12	10	8
Июль (2017)	10	0	3	3	7
Август (2017)	16	2	10	8	7
Всего	65	5	38	33	32

Частота корректного предупреждения P согласно выражению (24) для всего периода наблюдений составляет значение 0,87, значит, частота пропуска опасного явления F в соответствии с формулой (25) достигает 0,13. Частота ложных срабатываний R, получаемая из выражения (27), имеет значение 0,49. Несмотря на достаточно высокую статистическую вероятность корректного предупреждения (P = 0,87) и небольшую частоту ложных срабатываний (F = 0,49), рассматриваемый алгоритм автоматического предупреждения о грозоопасности на основе только данных грозопеленгационной сети имеет принципиальное ограничение, связанное с особенностью работы датчиков молний. Система датчиков LS8000, как и подавляющее большинство другихпассивных систем, реализует обнаружение МР за счет приема электромагнитного излучения, образующегося в результате движения заряда по ионизированному каналу молнии или излучения в лидерной стадии. Очевидно, что в случае попадания первого МР в контролируемую область заблаговременного предупреждения не происходит. Такая ситуация согласно проведенному анализу работы алгоритма прогнозирования МР на основе информации, получаемой от системы датчиков молний LS8000 в районе г. Нальчик, за период наблюдений с августа 2016 года по сентябрь 2017 года фиксировались 5 раз.

Использование данных измерителя напряженности электрического поля приземной атмосферы совместно с данными грозорегистратора в алгоритме двухзонного автоматического предупреждения о грозоопасности позволяет существенно повысить точность мониторинга и прогнозирования грозы. Применение датчика напряженности электрического поля позволяет фиксировать разделение атмосферных зарядов на расстояниях до 10–15 км, что является достаточным для обеспечения прогнозирования МР в контролируемой области (Зона 1). В предлагаемой методике в центре окружностей располагается измеритель напряженности электрического поля типа EFM 550 (зарубежные) или «Рябина» (отечественные). Указанные измерители достаточно схожи по тактико-техническим характеристикам. Критерием наличия над контролируемой областью кучево-дождевых облаков в зрелой стадии является превышение порогового значения напряженности поля 1000 В/м. Сигнал грозоопасности формируется в случае обнаружения датчиками грозопеленгационной сети МР в зоне предупреждения или при превышении фиксируемым значением градиента электрического поля порогового значения. Таймер отсчета времени выдержки также сбрасывается при повторных ударах в области предупреждения и превышении порога. Частота корректного предупреждения P при совместном использовании данных измерителя напряженности электрического поля и грозопеленгационной сети согласно выражению (24) составляет значение 1, что говорит об отсутствии случаев возникновения МР в контролируемой области без предварительного предупреждения (таблица 7).

Когда грозовая активность возникает около второй зоны, должен быть запущен режим грозового оповещения и должны начаться меры предупреждения.

Размер и масштаб зон должны быть выбраны в зависимости от эффективности определения координат молний, точности локализации системы детектирования электрического поля и масштаба цели. Данные измерителя напряженности электрического поля в точке PI и информация, полученная грозопеленгационной сетью, например ФГБУ «ВГИ», позволяет создавать мульти критерии для запуска системы предупреждения для «Зоны 1».

Предлагаемая методология применима и при использовании их аналогов. Следует отметить, что в настоящее время грозопеленгационная сеть Росгидромета с датчиками LS8000 покрывают практически всю Европейскую часть России.

Таблица 7 -Результаты работы алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности на основе использования данных грозопеленгационной сети и датчика напряженности электрического поля

Интервал наблюдений	Число предупреждений	МР в контролируемой области без предупреждения	C	S	A
Август (2016)	15	0	11	11	26
Май (2017)	6	0	2	2	31
Июнь (2017)	18	0	12	12	53
Июль (2017)	10	0	3	3	44
Август (2017)	16	0	10	8	57
Всего	65	0	38	38	201

Критические значения характеристик поля и в предлагаемой методологии предупреждения грозовой опасности представлена в таблице 8.

Таблица 8 - Характерные значения Е и информация о молниевой активности для оценки грозоопасности в «Зоне 1»

Значение Е в точке PI	0<E<200(В/м)	-200<E<200 (В/м)	-400<E<400 (В/м)	|E|>400 (В/м)
Грозовая деятельность в «Зоне 2»	0	Разряды: облачные - да наземные - нет	Разряды: облачные - да наземные - да	Разряды: облачные - да наземные - да
Грозовая деятельность в «Зоне 1»	0	маловероятно	Разряды: облачные - да наземные - нет	Разряды: облачные - да наземные - да
Дополнительные характеристики	–	$\frac{dE}{dt} > 0$	$\frac{dN_0}{dt} > 0$	$\frac{dN_H}{dt} > 0$
Оценка грозоопасности в «Зоне 1»	Не опасно	Не опасно	Слабая опасность	Высокая опасность

По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развития разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от -0,2 до + 0,2кВ/м., то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от -0,2кВ/м. и менее и при + 0,2кВ/м. и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от – 2кВ/м. и мене и при +2кВ/м. и больше наземные молнии. С ростом абсолютных значений градиента потенциала электрического поля атмосферы в начале имеет место разряды отрицательной полярности, при дальнейшем росте градиента при значениях больше (меньше) + 3кВ/м. (- 3кВ/м.) фиксируются наряду с облачными и отрицательными и положительные молниевые разряды. Указанные закономерности можно использовать для мониторинга грозовых явлений над особо важными молнии зависимыми объектами.

Заключение

1. Получены аналитические уравнения распределений значений токов молний различной полярности (отрицательные разряды между облаком и землей, положительные разряды молнии между облаком и землей, разряды внутри облака). Получены минимальные, максимальные, средние и модальные значения токов наземных молний положительной и отрицательной полярностей.

Для положительных наземных молний: Самый сильный 311 kA. Мода равна 10 kA, медиана вариант, расположенная в середине полученного упорядоченного вариационного ряда, делящая его на две равные части, равна 17 kA, среднее значение силы тока соответствует 22,9 kA. Дисперсия исследуемых сигналов – степень рассеяния вокруг среднего их значения - равна 304,05 $(kA)^2$, а среднеквадратическое отклонение 17,458 kA. Сумма всех положительных сигналов выборки составляет 722901 kA. Размах выборки, т.е. разница между максимальным и минимальным полученными сигналами, равен 301 kA.

Для отрицательных наземных молний: Самый слабый импульс измеренной силы тока составляет 4 kA. Самый сильный 210 kA. Мода равна 9 kA, медиана вариант, расположенная в середине полученного упорядоченного вариационного ряда, делящая его на две равные части равна 14 kA, среднее значение силы тока соответствует 16,8019 kA. Дисперсия исследуемых сигналов – степень рассеяния вокруг среднего их значения равна 140,648 $(kA)^2$, а среднеквадратическое отклонение 11,595 kA. Сумма всех отрицательных сигналов выборки составляет -530287 kA. Размах выборки – разница между полученными максимальным и минимальным сигналами 206 kA.

2. Получены статистические данные синхронных измерений молниевой активности различных типов (облачных и наземных) и напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах. Для юга Европейской части России характерно значительное преобладание облачных (межоблачных) разрядов молний до 87% от общего числа регистрируемых грозорегистраторомLS8000 молний. При этом доля положительных разрядов от общего числа наземных молний составляет около 23%, что соответствует значениям для средних широт (20%).

2.1. При развитии облака наблюдается скачок напряженности поля, вызванный внутриоблачнымиразрядами молний. При этом знак наведенного облачными разрядами поля может

быть как положительным, так и отрицательным. Отношение положительных к отрицательным изменениям поля составляет 1,23. Результаты свидетельствуют, что при отсутствии наземных молний облачные разряды в большинстве случаев приводят к увеличению положительного поля. Такое увеличение, как правило, не превышает +4кв/м.

2.2. Значительные скачки напряженности поля вызывают наземные разряды молний. Такое увеличение, как правило, может доходить до ± 10кв/м. При наземных разрядах молний отношение положительных к отрицательным изменениям поля составляет 0,99. Результаты свидетельствуют, что наземные молнии в равных случаях приводят к увеличению поля как в положительную, так и в отрицательную полярности.

2.3. По сравнению с фоновым полем (значения напряженности электрического поля атмосферы при «хорошей погоде») при грозах напряженности электрического поля атмосферы принимает значения от 200 В/м до ±10000В/м., следовательно, скачок поля может составлять в 50 раз как положительную, так в отрицательную полярности. При этом следует отметить, что величина скачков напряженности электрического поля атмосферы зависит также и от интенсивности (частоты) разрядов молний.

3. Выполнены количественные оценки корреляционных взаимосвязей между интенсивностью молний различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и значениями напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах в виде линейных выражений. Рассчитанные значения коэффициентов корреляции указанных параметров составили 0,8; 0,9 и 0,8 соответственно.

4. Определены критические значения градиента потенциала у поверхности земли при разрядах молний различных типов. Выявлено, что более 70% от общего количества разрядов в облаке происходят при фиксируемых у поверхности под облаком абсолютных значениях градиента потенциала электрического поля превышающих 2 кВ/м. При значениях градиента от – 2 до + 2 кВ/м формируются только менее 20% от общего числа разрядов. В этом диапазоне градиентов разряды на землю, как правило, не отмечаются. Наибольшее количество наземных молний (более 60%) отмечаются при градиенте потенциала электрического поля от – 4 до + 4 кВ/м.

5. Предложена методология оповещения о грозовой опасности, основанная на измерениях напряженностиэлектрического поля приземнойатмосферы и данных о молниевой активности для обеспечения безопасности самолетовпри взлете и посадки в аэропортах и для защиты особо важных объектов от молниевых разрядов. По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развитии разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от -0,2 до + 0,2кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от -0,2кВ/м и менее и при + 0,2кВ/м и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от – 2кВ/м и мене и при +2кВ/м и больше наземные молнии.

Совместное использование информации о координатах молниевых разрядов и напряженности электрического поля позволяет заблаговременно и с большей, чем при использовании данных исключительно грозопеленгационной сети, достоверностью прогнозировать возникновение опасного атмосферного явления.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Аджиев, А.Х. Исследование условий развития грозовых явлений и разработка рекомендаций по обеспечению безопасности полетов авиации / А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев, А.С. Болдырев, **В.А. Кузьмин** // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, Вып. 662, 2018. С.54 -57.

2. Аджиев, А.Х. Методология предупреждения грозовой опасности с использованием измерителей напряженности электрического поля и грозопеленгационной сети / А.Х. Аджиев, А.С. Болдырев, **В.А. Кузьмин**// Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел III. Радиотехника и связь. №7 (201), ноябрь 2018. - С.166-177.

3. Шаповалов, А.В. Формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков в зависимости от структуры поля ветра в атмосфере / А.В. Шаповалов, Е.А. Ковалев, З.Х. Гучаева, К.М. Беккиев, **В.А. Кузьмин** //Вестник За.ГУ.2019. Т.25.№4,-С.21-31.

4. Аджиев, А.Х. Аппаратно – программный комплекс для мониторинга электрических и грозовых явлений в атмосфере. / А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев, Д.Д. Кулиев, С.Т. Казакова, **В.А. Кузьмин** // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. С. 5 – 11.

Публикации в других изданиях:

5. Аджиев А.Х., Машуков Х.М., БолговЮ.В., **Кузьмин В.А** Программа сбора, обработки и представления информации, поступающей от сети устройств наземного мониторинга очагов опасных природных явлений «MountainTorrent» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611946 от 13 февраля 2014 г.

6. АджиевА.Х., БолговЮ.В., **Кузьмин В.А.** Программа обработки и визуализации результатов измерения напряженности электрического поля атмосферы «Electricfieldstrength». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014612901 от 12 марта 2014 г.

7. Аджиев, А.Х. Аппаратура и методика синхронных регистраций микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков. / А.ХАджиев, А.А. Аджиева, А.М. Абшаев, Н.В. Юрченко, **В.А. Кузьмин** // Материалы III Всероссийской конференции и школы для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: ЮФУ, 2016. С. 89 -90.

8. Аджиев, А.Х. Аппаратно-программный комплекс пространственно-временного мониторинга атмосферного электричества. / А.ХАджиев, Ю.В. Болгов, Д.Д. Кулиев, Н.В. Юрченко, **В.А. Кузьмин** // Материалы III Всероссийской конференции и школы для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: ЮФУ, 2016. С.91.

9. **Кузьмин, В.А.** Атмосферно - электрические процессы при грозах./ В.А. Кузьмин // Материалы Международной конференции «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», Ставрополь 2018, С. 68-72.

10. Кузьмин, В.А.Взаимосвязь грозовых явлений в облаках и напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли./ В.А. Кузьмин// Материалы V Всероссийской научной конференции и школы для молодых ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техносферной безопасности», Таганрог,5-6октября2018г.С.200-202

11. Аджиев, А.Х. Влияние орографии на динамику электрических явлений в атмосфере. / А.Х. Аджиев, Д.Д. Кулиев, С.Т. Казакова, Н.В. Юрченко, **В.А. Кузьмин** // Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь»,Борок, 25 − 29 сентября 2017 г.

Личный вклад в совместных публикациях. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат следующие результаты: работы 1 - 3- выполнены на паритетной основе; работы 4, 5 – постановка задач выполнены совместно, расчеты и анализ результатов принадлежат соискателю; работы 6, 7 –экспериментальная часть выполнена совместно с соавторами, анализ результатов принадлежит соискателю; работы 8 - 11 – анализ результатов принадлежит соискателю.