Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный университет"

На правах рукописи

Юсупов Игорь Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГРОЗОВОГО ПРОЦЕССА В ПРИЛОЖЕНИИ К МОНИТОРИНГУ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург, 2018

Работа выполнена на кафедре радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент, Кононов Игорь Иванович, ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет", доцент кафедры радиофизики

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Дивинский Леонид Исаевич, ФГБОУ ВО "Российский государственный гидрометеорологический университет", профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета

кандидат физико-математических наук, Михайловский Юрий Павлович, ФГБУ "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова", ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

Защита состоится 20 июня 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.44 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, В.О., Средний пр., 41-43, ауд. 304.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, д. 3, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.232.44 А.В. Комолкину.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького СПбГУ по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9. Диссертация и автореферат диссертации размещены на сайте https://disser.spbu.ru/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/1695.html.

Автореферат разослан "_____"_____ 20____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.232.44
кандидат физико-математических наук А.В. Комолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Незатухающий интерес к изучению грозовых процессов и сопровождающего их развитие электромагнитного излучения в последние годы получил дополнительный импульс в связи с открытием целого ряда новых электрических и токовых источников в структуре глобальной электрической цепи, связанных с грозовой активностью. Эти открытия вызвали резкую интенсификацию экспериментальных исследований грозовой активности посредством спутниковых наблюдений, а также развертываемых по всему миру наземных радиотехнических систем пассивной локации грозовых очагов континентального и глобального масштабов. Большинство таких систем основывается на регистрации и анализе электромагнитного радиоизлучения наиболее сильноточных разрядных компонент молниевых вспышек – обратных ударов, развивающихся между землей и облаком. Максимум импульсного ЭМИ этих разрядов сосредоточен в СДВ диапазоне, что обеспечивает его прием с высоким отношением сигнал/шум на расстояниях до нескольких тысяч километров.

Не потеряли актуальности продолжающиеся исследования грозовой активности как источника постоянной повышенной опасности в различных сферах жизнедеятельности человека, направленные на решение традиционных задач, связанных с ее своевременным обнаружением и предотвращением возможных последствий вредного воздействия на различные объекты этой деятельности (летательные аппараты, высотные здания, промышленные и портовые сооружения, нефтеналивные суда, открытые горные разработки, коммуникационные линии, лесные массивы и пр.). Требования к средствам мониторинга грозовой активности, обеспечивающих решение этих задач, существенно ужесточаются. Необходимо не только повышать надежность обнаружения начала и окончания грозы и с высокой точностью осуществлять ее трассирование, но также определять текущую фазу развития грозового процесса, оценивать степень его грозоопасности и, по возможности, осуществлять краткосрочный прогноз последующего развития. Подобные требования к текущему мониторингу возникают для ряда практических потребностей, связанных с обеспечением безопасности многих объектов,

подверженных воздействию не только прямых ударов молний, но и мощного импульсного излучения сильноточных молниевых разрядов, возможных в процессе развития молниевых вспышек всех типов – как облако-земля (ОЗ), так и внутриоблачных (ВО).

Наибольшее практическое применение для пассивной локации гроз в последние десятилетия получили многопунктовые пеленгационные (ПСМ) и разностно-дальномерные (РДСМ) системы местоопределения. При этом предпочтение отдается развитию РДСМ, несмотря на то, что для их развертывания и использования требуется большее количество разнесенных пунктов регистрации атмосфериков, более высокие требования к дискретизации сигналов и точности их временной синхронизации. К относительным недостаткам таких систем можно отнести высокую стоимость оборудования и эксплуатации, необходимость использования средств высокоточной синхронизации разнесенных пунктов и массовых коммуникационных сетей, обеспечивающих оперативных обмен данными.

Отмеченные обстоятельства требуют поиска и разработки альтернативных методов и технических средств мониторинга грозовой активности, обеспечивающей своевременное оповещение о приближающейся грозовой опасности.

Одним из таких средств мониторинга могут служить однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры (ГПД), которые занимают особое место в структуре устройств и систем местоопределения. По точности локации отдельных молниевых разрядов они заметно уступают многопунктовым системам локации гроз, развертываемым в большинстве стран мира. Однако в силу целого ряда преимуществ, обусловленных однопунктовым расположением, которое обеспечивает их автономность, высокую мобильность, облегчает и удешевляет развертывание и эксплуатацию, не требует использования высокоточных средств временной привязки регистрируемых сигналов, дорогостоящих каналов связи, интерес к разработке таких систем сохраняется до настоящего времени. По сути, они остаются единственным средством оперативного грозооповещения на бортах летательных аппаратов, судах нефтеналивного флота, а также наземных автономных объектах, не оборудованных современными средствами связи и временной привязки.

Цели и задачи

Основной целью работы являются экспериментальные и модельные исследования импульсного электромагнитного излучения сильноточных компонент молниевых вспышек как ОЗ, так и ВО типов, направленное на улучшение точностных и вероятностных характеристик инструментальных средств мониторинга грозовой активности.

Задачи работы:

- экспериментальные исследования вариаций форм и параметров импульсного электромагнитного излучения гроз;
- разработка алгоритма классификации регистрируемых импульсов ЭМИ сильноточных молниевых разрядов по типовым формам, в усредненном виде описывающим изменения форм атмосфериков, обусловленные вариациями источников излучения;
- разработка модели сильноточного молниевого разряда произвольной пространственной конфигурации как источника импульсного электромагнитного излучения с целью объяснения наблюдаемого различия между формами ортогональных составляющих горизонтальной компоненты магнитного поля и оценки границ применимости дипольного приближения;
- экспериментальные и модельные исследования особенностей трансформации форм атмосфериков при их распространении в волноводном канале Земля-ионосфера с целью оценки погрешностей разностно-дальномерных систем местоопределения и выработки рекомендаций по их уменьшению;
- разработка методики формирования банка канонических форм импульсов электромагнитного излучения молниевых разрядов СДВ диапазона и создание модельной версии такого банка с целью использования в однопунктовом методе дальнометрии;
- разработка нового однопунктового метода местоопределения координат молниевого разряда с расширенной (10…1500 км) зоной оперативного обслуживания;
- разработка алгоритма пространственно-временной кластеризации местоположений молниевых разрядов и методики информативного отображения перемещения гроз с оценкой их текущей фазы и

краткосрочным прогнозом последующего развития с целью использования при оперативном мониторинге грозовой активности.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем.

- Проведены экспериментальные исследования вариаций форм и параметров импульсного электромагнитного излучения из выделенных, с использованием разработанного алгоритма пространственно-временной кластеризации, кластеров, позволившие оценить параметры ЭМИ в зависимости от типа грозы и фазы ее развития. Обнаружены существенные различия форм ортогональных составляющих горизонтального магнитного поля в ближней зоне, которые не могут быть объяснены в рамках общепринятых моделей молниевых разрядов.
- Разработана методика классификации форм атмосфериков СДВ диапазона по типам. В отличие от известных подходов, классификация осуществляется по сигналам, зарегистрированным в жестко ограниченном интервале расстояний (50…150 км), что позволяет свести к минимуму влияние на форму сигналов факторов, не связанных с источником: а) статического и индукционного слагаемых в дипольном представлении поля, б) сферичности и конечной проводимости земли, в) ионосферных отражений.
- Разработана модель молниевого разряда произвольной пространственной конфигурации как источника импульсного электромагнитного излучения. С помощью модели впервые были получены количественные оценки нижней границы применимости дипольного приближения для таких типов молниевых разрядов и объяснено наблюдаемое на ближних расстояниях различие форм горизонтальных ортогональных составляющих магнитного поля.
- Впервые проведены детальные численные исследования особенностей трансформации форм атмосфериков при распространении в волноводном канале Земля-ионосфера для различных типов источника, расстояний и условий распространения, позволившие количественно оценить точностные характеристики разностно-дальномерных систем местоопределения и дать рекомендации по их улучшению;

- Разработана методика формирования банка канонических форм молниевых разрядов, основанная на использовании программного комплекса расчета импульсных сигналов СДВ диапазона для произвольных расстояний, условий распространения и типов источника.
- Разработан новый метод однопунктового местоопределения гроз с расширенной (10…1500 км) зоной оперативного обслуживания, основанный на использовании широкополосного рамочного СДВ пеленгатора, работающего по переднему фронту земной волны атмосферика, и дальномерного блока, включающего усовершенствованную версию фазового ЕН алгоритма дальнометрии ближней зоны (10…100 км) и оригинальный алгоритм дальнометрии средней зоны (100…1500 км).
- Разработана методика пространственно-временной кластеризации и информативного отображения грозовой активности, позволяющая, в отличие от существующих подходов, осуществлять оценку текущей фазы грозы и краткосрочный прогноз ее последующего развития.

Научная и практическая значимость работы

- Проведенные экспериментальные исследования вариаций форм и параметров импульсного электромагнитного излучения гроз отдельных грозовых очагов в различных условиях развития грозовой активности позволили оценить адекватность разрабатываемых теоретических и численных методов расчета полей, а также возможность использования СДВ систем для обнаружения и местоопределения молниевых разрядов всех типов.
- Разработанная методика классификации атмосфериков позволила получить конечное число типовых форм, достаточное для модельных описаний источника при расчете полей.
- Разработанная модель молниевого разряда позволила объяснить значительное влияние на форму рассчитываемых полей пространственных вариаций молниевого канала, проверить применимость дипольного приближения излучателя, а также оценить поляризационные ошибки пеленгаторов.

- Проведенные детальные численные исследования особенностей трансформации форм атмосфериков позволили оценить погрешности систем местоопределения и дать рекомендации по их уменьшению.
- Разработанная методика формирования банков канонических форм атмосфериков апробирована в однопунктовом алгоритме дальнометрии средней зоны (до 1500 км) и может быть рекомендована для применения в многопунктовых системах местоопределения гроз для определения типа источника и предварительной оценки его удаленности.
- Разработанный метод однопунктового местоопределения гроз с расширенной (10…1500 км) зоной оперативного обслуживания апробирован с использованием пеленгационной системы местоопределения средней зоны (базовое расстояние между пунктами 2450 км) и может быть рекомендован для использования как в автономном режиме, так и в разнесенных пунктах многопунктовых систем в качестве вспомогательного инструмента для предварительной грубой (5…15%) оценки дальности.
- Разработанный адаптивный алгоритм пространственно-временной кластеризации используется для информативного отображения грозовой активности. Регистрация и анализ сопутствующего выделенным кластерам импульсного излучения позволяет оценивать текущую фазу грозовой активности и давать краткосрочный прогноз ее развития

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения.

1. Модель молниевого разряда как источника импульсного электромагнитного излучения. В отличие от существующих подходов, в которых молниевый разряд представляется в виде линейного вертикального излучателя с основанием, расположенным на поверхности земли, модель учитывает произвольные положения основания многосегментного молниевого канала над земной поверхностью и произвольную пространственную конфигурацию его сегментов. Это позволило описывать поля, возбуждаемые не только разрядами облако-земля, но и внутриоблачными разрядами. С помощью этой модели впервые получены 1) количественные оценки нижней границы применимости дипольного приближения молниевого разряда по

расстоянию, которые оказались равными 15...20 км для разрядов облако-земля и 30…50 км для внутриоблачных разрядов, и 2) объяснено наблюдаемое на ближних расстояниях различие форм горизонтальных ортогональных составляющих магнитного поля.

2. Методика классификации форм атмосфериков СДВ диапазона по типам. Формы выделялись с использованием разработанного автором алгоритма пространственно-временной кластеризации грозовой активности, при определенных ограничениях на их пространственное расположение относительно пункта регистрации. Это позволило, в отличие от существующих подходов, свести к минимуму влияние на формы: а) статического и индукционного слагаемых в дипольном представлении излучателя, б) сферичности и конечной проводимости земли, в) ионосферных отражений. Методика позволила получить конечное число типовых форм, достаточное для модельных описаний источника при расчете полей.
3. Впервые проведены детальные численные исследования особенностей трансформации форм атмосфериков при распространении в волноводном канале Земля-ионосфера для различных типов источника, расстояний и условий распространения, позволившие количественно оценить точностные характеристики разностно-дальномерных систем местоопределения и дать рекомендации по их улучшению. На основе исследований создан банк канонических форм атмосфериков для различных типов источника, расстояний и условий распространения, используемый в алгоритме однопунктового местоопределения гроз.
4. Метод однопунктового местоопределения гроз с расширенной (10…1500 км) зоной оперативного обслуживания, основанный на использовании широкополосного рамочного СДВ пеленгатора, работающего по переднему фронту земной волны атмосферика, и дальномерного блока, использующего усовершенствованную версию фазового ЕН алгоритма дальнометрии ближней зоны (10…100 км) и оригинальный алгоритм дальнометрии средней зоны (100…1500 км). Улучшение точности местоопределения до 5…15% в ближней зоне (10…100 км) достигается учетом невертикальности дипольного момента и интегральным способом получения оценки

дальности, а в средней зоне (100…1500 км) обеспечивается использованием сформированного банка канонических форм атмосфериков.

Степень достоверности и апробация результатов

Точностные и вероятностные характеристики рассматриваемых методов и средств мониторинга грозовой активности оценивались с использованием в качестве поверочных инструментов: многопунктовой интерферометрической УКВ-системы SAFIR (Франция), многопунктовыми разностно-дальномерными СДВ системами Алвес (Россия), Blitzortung (Германия), Wetterzentrale (Германия). Адекватность алгоритмов расчета полей от сильноточных молниевых разрядов оценивалась путем сопоставления расчетных форм атмосфериков с экспериментально зарегистрированными в пределах средней зоны (100…1500 км) на различных расстояниях и в разных условиях распространения.

Основные результаты работы обсуждались на следующих научных конференциях:

- Глобальная электрическая цепь. Вторая Всероссийская конференции (Борок, 2015);
- VII, VI, V Всероссийские конференции по атмосферному электричеству (СПб, 2012, Нижний Новгород, 2007, Владимир, 2003);
- XVII Международная конференция "Радиолокация, навигация, связь" (Воронеж, 2011);
- Региональные XI, XVI, XVII конференция по распространению радиоволн (СПб, 2005, 2010, 2011);

Публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 25 работах. Из них 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 19 работ представляют собой опубликованные материалы докладов на научно-технических конференциях международного, всероссийского и регионального уровней.

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в изготовлении и развертывании экспериментальных установок, проведении экспериментальных

измерений, их последующей обработке и анализе, разработке программного обеспечения, а также в получении всех результатов, изложенных в диссертационной работе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и шести приложений. Общий объем диссертации составляет 202 страницs, включая 133 рисунка и список литературы из 114 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы диссертации, определяются цели и задачи работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обсуждаются особенности импульсного электромагнитного излучения, сопровождающего развитие сильноточных компонент молниевых вспышек разных типов, проводится сравнительный анализ основных моделей молниевых разрядов как источников этого излучения, приводится краткий обзор существующих пассивных радиотехнических средств мониторинга грозовой активности, основанных на использовании электромагнитного излучения гроз СДВ диапазона.

Во **второй главе** анализируется структура и параметры импульсного радиоизлучения гроз на основе экспериментальных данных, полученных в ходе проведения совместной работы НКТБ «Радиофизика» при ЛГУ с французской научно-производственной фирмой "Dimensions". Обсуждается методика классификации форм атмосфериков СДВ диапазона по типам для выделенных грозовых очагов и приводятся результаты ее использования. На Рис. 1 в качестве иллюстрации приведено несколько образцов усредненных форм атмосфериков, полученных на основе данной методики.

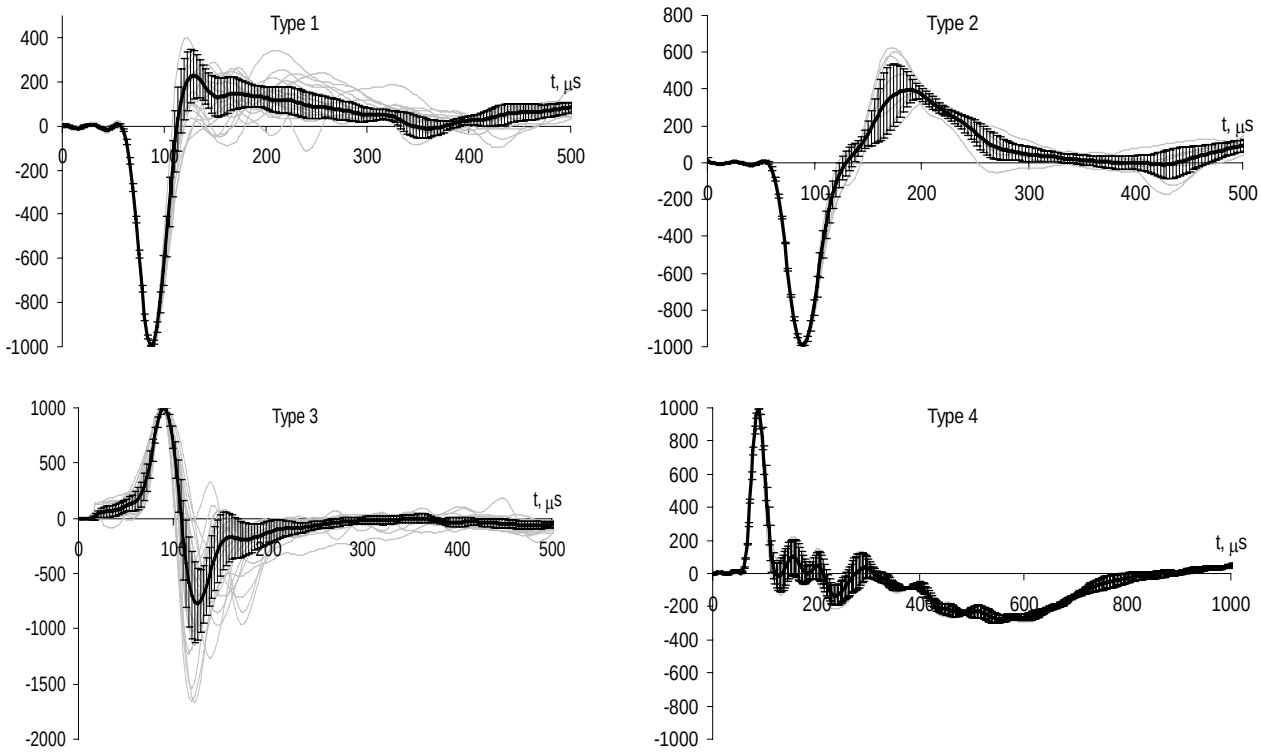


Рис. 1. Образцы типовых форм атмосфериков, зарегистрированных в пределах нижней границы волновой зоны (50…150 км)

При обработке сигналов в ближней зоне (до 20…30 км) наблюдаются различия временных форм сигналов ортогональных компонент горизонтальной составляющей магнитного поля, которые не могут быть объяснены в рамках дипольного представления излучателя. На Рис. 2а представлен образец экспериментально зарегистрированных временных форм H_x и H_y составляющих. Годограф, приведенный на Рис. 2б, более наглядно иллюстрирует различие этих форм, а также вариации пеленга на источник, формируемого по мгновенным временным отсчетам регистрируемых магнитных компонент.

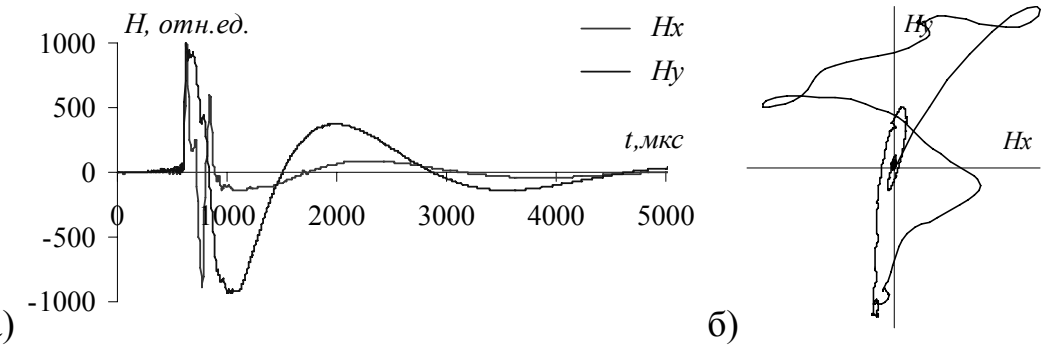


Рис. 2. а) Образцы форм горизонтальных составляющих компонент H_x, H_y магнитного поля; б) их годограф.

Третья глава посвящена модельному исследованию электромагнитного излучения гроз. В ней рассматривается многосегментная модель молниевого разряда (схематически представлена на Рис. 3, учитывающая возможные пространственные изменения структуры протяженного молниевого канала.

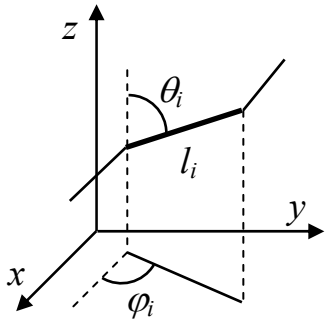
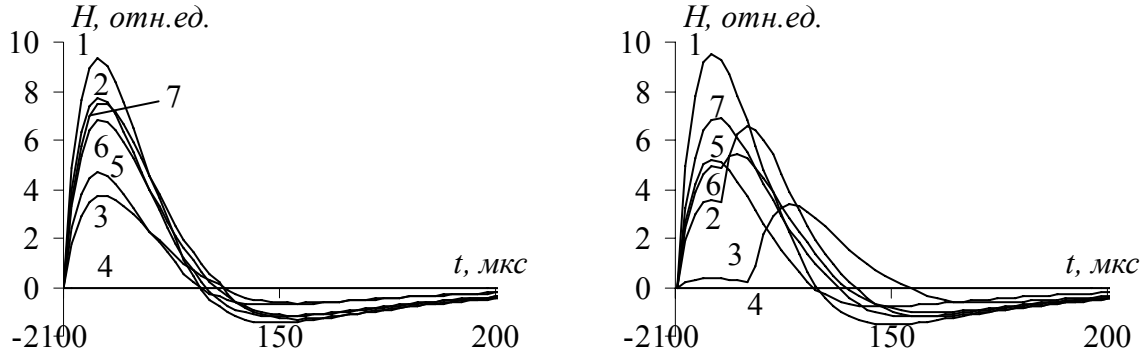


Рис. 3. Геометрия и обозначения для наклонного сегмента молниевого канала, расположенного над плоской идеальнопроводящей земной поверхностью.

Наличие земли учитывается введением зеркального источника. Переход в местную систему координат, связанную с сегментом, позволяет свести исходную проблему к решенной ранее задаче о линейном излучателе в свободном пространстве [Borisov, Kononov, 1996]. Рассчитав поля для каждого сегмента, переходим в исходную систему координат и суммируем их, получая поле всего разряда. Проведены исследования форм импульсов электромагнитного излучения для разных конфигураций молниевого канала и положений точки наблюдения на и над земной поверхностью. Частные примеры форм горизонтальной магнитной составляющей, рассчитанные для односегментной наклонной модели разряда на расстоянии 30 км, иллюстрирующие их изменения в зависимости от угла возвышения приемника, приведены на Рис. 4.



а) б)

Рис. 4. Поле линейного излучателя в зависимости от угла возвышения приемника. Угол меняется от 0° (линия 1) до 180° (линия 7) с шагом 30° для основания излучателя, а) расположенного на земле; б) поднятого на высоту 3 км.

Получены количественные оценки нижней границы применимости дипольных представлений протяженных излучателей, которые оказались 10…30 км для разрядов ОЗ типа и 30…50 км для разрядов ВО типа.

С помощью модели объяснено замеченное ранее различие форм магнитных компонент поля в ближней зоне, образец которого приведен в предыдущей главе. В качестве иллюстрации на Рис. 5 приведен пример расчета полей и годограф для трехсегментной модели молниевого разряда.

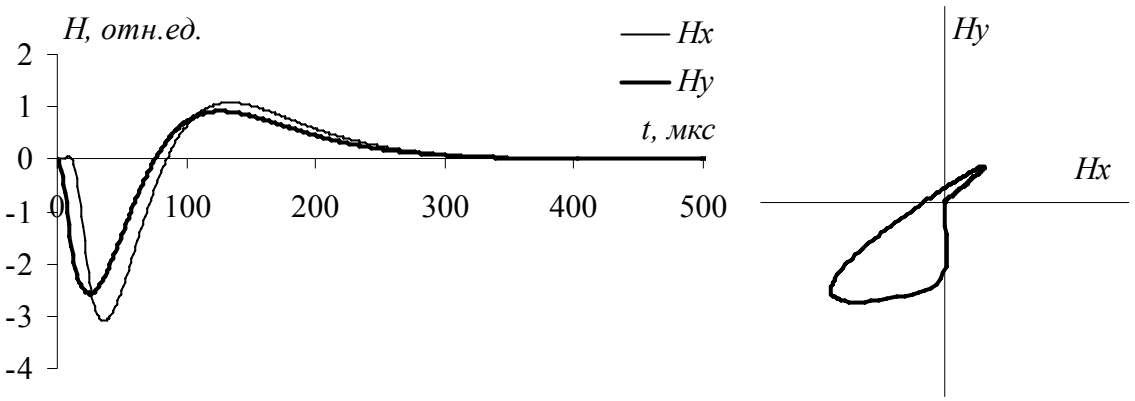


Рис. 5. Формы магнитных компонент поля и годограф, рассчитанные для трехсегментной модели разряда.

Для расчетов импульсных сигналов в средней зоне задействован программный комплекс, разработанный на кафедре радиофизики СПбГУ, основанный на представлении решения для точечного диполя в виде разложений по скачкам. Исследуются особенности трансформации форм атмосфериков и их параметров при распространении в волноводном канале Земля-ионосфера.

Проведено сопоставление экспериментально зарегистрированных атмосфериков и рассчитанных сигналов с использованием типовых форм, показывающая адекватность используемого программного комплекса. Обсуждается методика формирования банка канонических форм атмосфериков на его основе.

В **четвертой главе** рассмотрены возможности использования результатов модельных исследований, приведенных в третьей главе, при решении задач местоопределения молниевых разрядов. В качестве одного из примеров рассматриваются результаты анализа ошибок местоопределения, возникающих в разностно-дальномерных системах вследствие влияния эффектов распространения. Приводятся результаты анализа характерных точек сигналов,

используемых для их временной привязки в разностно-дальномерных системах местоопределения гроз, позволившие оценить погрешности таких систем и дать рекомендации по их уменьшению.

В качестве второго примера рассматривается возможность построения однопунктового грозопеленгатора-дальномера молниевых разрядов с расширенной (10…1500 км) зоной оперативного обслуживания, состоящего из а) широкополосного рамочного пеленгатора, б) модифицированного фазового ЕН дальномера ближней зоны (с радиусом действия до 100 км) и в) дальномера средней зоны (100…1500 км), основанного на использовании сформированного банка канонических форм атмосфериков.

Проверка работоспособности пеленгатора в средней зоне осуществлялась с использованием данных разностно-дальномерной системы Wetterzentrale (точность местоопределения 30…40 км). Была выявлена систематическая ошибка, после учета которой погрешность работы пеленгатора характеризовалась случайной ошибкой с СКО 1…2°.

В основе дальномера ближней зоны лежит использование модифицированного фазового ЕН алгоритма, основное отличие которого от известных методов связано с возможностью учета невертикальности дипольного момента и интегральным способом получения оценки дальности. В главе приводятся оценки погрешностей, связанные с различными источниками. Особенно существенное влияние на точность оценки дальности оказывают низкочастотные индустриальные наводки. Предложен эффективный компенсационный метод их устранения.

Проведена экспериментальная проверка работы грозопеленгатора-дальномера. В ближней зоне (до 100 км) в качестве поверочного инструмента использовалась многопунктовая УКВ система SAFIR. Результаты сопоставления синхронных срабатываний показали, что минимальная погрешность (5%) имеет место в средней части (30…50 км) рабочей зоны дальномера ближней зоны и увеличивается до 15% при приближении к ее нижней (10 км) и верхней (100 км) границам. Оценка точностных характеристик алгоритма местоопределения средней зоны (100…1500 км) осуществлялась по данным локации молниевых разрядов, полученных с использованием специально развернутой двухпунктовой ПСМ с базовым расстоянием 2450 км. Оказалось, что величина относительной погрешности

местоопределения тестируемого алгоритма составляет 5…15%. В качестве независимого поверочного средства использовались данные местоопределения гроз многопунктовой РДСМ Wetterzentrale (Германия). Сопоставление данных показало достаточно хорошее совпадение очагов грозовой активности над Европой, укладывающееся в пределы приведенных выше значений относительных погрешностей.

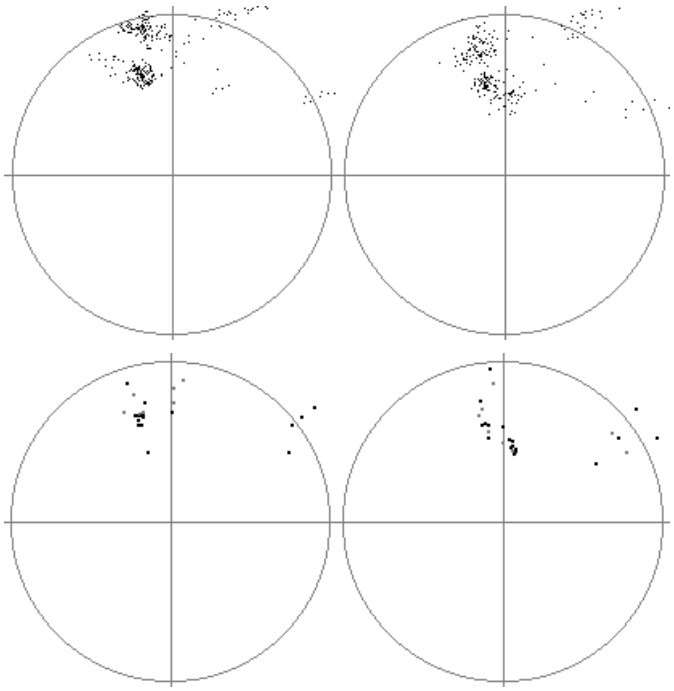


Рис. 6. а) Поточечное 15 минутное отображение грозовой активности 31-05-2001, локализованной системой SAFIR (вверху) и однопунктовым ГПД (внизу).

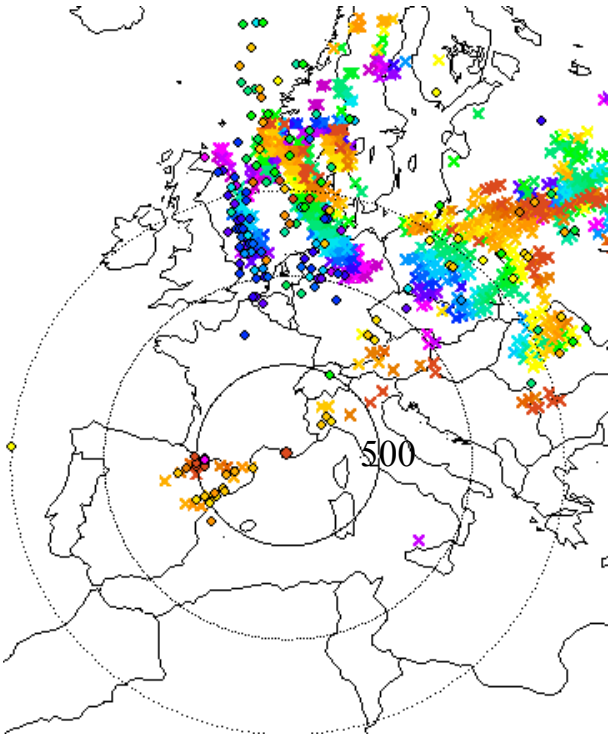


Рис. 7. Карта грозовой активности за 08-07-001 г. Крестиками отмечены местоположения молниевых разрядов, определенные с помощью разностно-дальномерной системы Wetterzentrale, кружками – однопунктовым дальномером средней зоны

Важной стороной мониторинга грозовой активности является ее информативное отображение. В главе рассматривается метод отображения и хранения данных о местоположении молниевых разрядов, основанный на применении кластерного анализа, который позволяет выделять пространственно разнесенные очаги (кластеры) грозовой активности и, при необходимости, соотносить регистрируемое излучение (используемое для

решения задач, связанных с оценкой текущей фазы грозы и краткосрочным прогнозом ее развития) с выделенными очагами.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения работы:

- Проведены экспериментальные исследования вариаций форм и параметров импульсного электромагнитного излучения гроз. Обнаружены существенные различия структуры горизонтальных ортогональных компонент магнитного поля в ближней зоне, которые не могут быть объяснены в рамках существующих моделей молниевых разрядов. Результаты совместных экспериментальных исследований, проведенных с французской фирмой DIMENSIONS (УКВ система SAFIR), показали возможность использования СДВ средств для обнаружения и местоопределения сильноточных компонент молниевых вспышек всех типов.
- Разработана методика классификации форм атмосфериков по типам, позволяющая исключить возможные вариации, обусловленные эффектами распространения. Данная методика позволила сформировать несколько усредненных форм наиболее часто встречающихся атмосфериков, возбуждаемых в процессе развития молниевых вспышек и которые могут быть использованы при решении различных утилитарных прикладных задач, связанных с необходимостью расчета импульсов электромагнитного излучения СДВ диапазона в волноводном канале Земля-ионосфера.
- Разработана модель молниевого разряда как источника импульсного электромагнитного излучения, учитывающая возможные пространственные изменения геометрии молниевого канала. Проведены исследования форм импульсов электромагнитного излучения в зависимости от геометрии молниевого канала и расположения точки наблюдения на земле и над земной поверхностью. Получены количественные оценки границы применимости дипольных представлений протяженных излучателей, а также поляризационных ошибок рамочных пеленгаторов в ближней зоне.
- Проведены детальные численные исследования особенностей трансформации форм и параметров атмосфериков при их распространении в

волноводном канале Земля-ионосфера для различных типов источника, расстояний и условий распространения.

- Проведено исследование путей повышения точностных характеристик разностно-дальномерных систем местоопределения гроз путем введения поправок на распространение. Показано, что при размерах баз, не превышающих 300…400 км, погрешности временной привязки сигналов в разнесенных пунктах системы в пределах ее внутренней зоны обслуживания не превышают 1…2 мкс, что позволяет обходиться без введения каких-либо поправок. Однако, при большой разности расстояний между излучателем и различными пунктами регистрации (что может иметь место в большебазовых системах) введение таких поправок становится необходимым.
- Разработана методика создания банка канонических форм атмосфериков для разных типов сигналов, расстояний и условий распространения. Показана адекватность формируемых расчетных образцов экспериментально зарегистрированным сигналам. Сформированный банк может быть использован в различных приложениях. В частности, опытная версия такого банка была использована при разработке и эксплуатации однопунктового алгоритма дальнометрии средней зоны.
- Разработан однопунктовой метод местоопределения гроз с расширенной (до 1500 км) зоной оперативного обслуживания, основанный на использовании широкополосного пеленгатора, модифицированного фазового ЕН алгоритма дальнометрии ближней зоны и усовершенствованного алгоритма дальнометрии средней зоны. Проведены экспериментальные оценки точностных характеристик разработанного однопунктового алгоритма местоопределения и показано, что среднеквадратичная ошибка местоопределения составляет 5…15%.
- Разработан адаптивный алгоритм пространственно-временной кластеризации грозовой активности, используемый для выделения грозовых образований различных пространственно-временных масштабов (отдельная грозовая конвективная ячейка, многоячейковый грозовой очаг, крупномасштабный грозовой комплекс). Путем соответствующего выбора параметров кластеризации он может быть использован при работе

различных систем местоопределения гроз, как многопунктовых – пеленгационных и разностно-дальномерных, так и однопунктовых грозопеленгаторов-дальномеров.

- Разработана методика информативного отображения грозовой активности, основанная на кластерном анализе. Она может применяться для трассирования грозовых образований различных пространственно-временных масштабов в реальном времени. Регистрация сопутствующего импульсного излучения с последующим оперативным анализом его параметров позволяет оценить текущую фазу грозовой активности и дать краткосрочный прогноз ее развития.

Литература

1. Диневич Л.А. Малыхин А.В., Снегуров В.С. Результаты наблюдений за грозами по счетчикам молний различной конструкции // Труды ГГО. - 1975. - Вып. 358. - С. 78-85.
2. Дульзон А.А., Потапкин В.И. А.с. 569995 СССР, МКЛ2 G 01 W 1/14. Устройство для регистрации молний / А.А. Дульзон, В.И. Потапкин - № 2327644/10; заявл. 18.02.76; опубл. 25.08.77, Бюл. № 31. - 3 с.
3. Курилов В.А., Дронов К.А., Смирнов Г.Н. А.с. 543966 СССР, МКЛ^2 G 08 B 23/00. Анализатор грозоопасности / В.А. Курилов, К.А. Дронов, Г.Н. Смирнов. - № 2164844/24; заявл. 25.07.75; опубл. 25.01.77, Бюл. № 3. - 4 с.
4. Иньков Б.К. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков // Труды ГГО. - 1973. - Вып. 319. - 136 с.
5. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. - Л.: Гидрометеоиздат, 1986. - 222 с.
6. Краснитский Ю.А. Пассивная локация молниевых разрядов на основе анализа атмосфериков в рамках скачковой модели их распространения в волноводе "Земля-ионосфера" // Научный вестник МГТУ ГА. - 2010. - № 158. - С. 149-155.
7. Павлюченков Г.Ф., Иньков Б.К. А.с. 1140083 СССР, G 01 W 1/16. Устройство для регистрации грозовых разрядов / Г.Ф. Павлюченков, Б.К. Иньков. - № 3647122/24-10; заявл. 27.09.83; опубл. 15.02.85, Бюл. № 6. - 3 с.

8. Снегуров В.С., Ардатов И.В. А.с. 1190321 СССР, G 01 S 13/95. Фазовый анализатор грозоопасности / В.С. Снегуров, И.В. Ардатов. - № 3757860/24-09; заявл. 31.05.84; опубл. 07.11.85, Бюл. № 41. - 6 с.
9. Bruce C.E.R. and Golde R.H. The lightning discharge. J. Inst. Elect. Eng. - Pt. 2. - 1941. - Vol. 88. - P. 487-520.
10. Heidler F. Traveling current source model for LEMP calculation // Proc. 6 Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat. - Zurich, 1985. - P. 157-162.
11. McLain D.K., Uman M.A. Exact Expression and Moment Approximation for the Electric Field Intensity of the Lightning Return Stroke // J. Geophys. Res. – 1971. - Vol. 76, N 9. - P. 2101-2105.
12. Nucci C.A., Mazzetti C., Rachidi F., and Ianoz M. On lightning return stroke models for LEMP calculations // Proc. 19 Int. Conf. Lightning Protection. - Graz, 1988.
13. Panyukov A.V. Estimation of the Location of an Arbitrarily Oriented Dipole Under Single-Point Direction Finding // J. Geophys. Res. - 1996. - Vol. 101, No. D10. - P. 14977-14982.
14. Rakov V.A. and Dulzon A.A. Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke // Tekh. Elektrodinam. - 1987. - No. 1. - P. 87-89.
15. Ryan P.A., Spitzer N. Stormscope: US4023408A : Int. Cl^2 G01W 1/00 / Paul A. Ryan, Nicholas Spitzer. - Appl. number 694620; filed Jun. 10, 1976; publ. date May 17, 1977. - 30 p.
16. Uman M.A., McLain D.K. Magnetic field of the lightning return stroke // J. Geophys. Res. - 1969. - Vol. 74. - P. 6899-6910.

Публикации по диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кононов И.И., Снегуров А.В., Снегуров В.С., Юсупов И.Е.. Модельные расчеты эффективности гиперболической системы местоопределения молниевых разрядов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. - 2016. - № 581. - С. 193-199.
2. Кононов И.И., Снегуров А.В., Снегуров В.С., Юсупов И.Е.. Амплитудно-гиперболический метод местоопределения молниевых разрядов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. - 2016. - № 581. - С. 176-192.

3. Кононов И.И., Снегуров А.В., Снегуров В.С., Юсупов И.Е.. Точностные характеристики разностно-дальномерной системы местоопределения гроз // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. - 2014. - № 575. - С. 131-141.
4. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Кандарацков Н.В. Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозового разряда // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 2013. - Т. 56, - № 11-12. - С. 875-888.
5. Кононов И.И., Крутой Д.М., Юсупов И.Е. Альтернативное обеспечение грозобезопасности на объектах водного транспорта // Журнал университета водных коммуникаций. - 2013. - № 3. - С. 116-121.
6. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Кластеризация грозовой активности // Радиотехника и электроника. - 2004. - Т. 49, № 3, - С. 283-291.

Статья в Scopus:

7. Igor I. Kononov, Igor E. Yusupov. A simplified “engineering” return stroke model // Proc. 31 International Conference on Lightning Protection. - Vienna, 2012. - P. 634406_1-6.

Публикации в других изданиях:

8. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Изменение параметров электромагнитного излучения в процессе эволюции грозовых очагов // Глобальная электрическая цепь: материалы Второй Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория "Борок" – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. - Ярославль: Филигрань, 2015. - С. 53-54.
9. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Крутой Д.М. Методика и результаты формирования банков канонических форм атмосфериков // Сб. трудов VII всероссийской конференции по атмосферному электричеству. - СПб, 2012. - Т. 1. - С. 131-133.
10. Крутой Д.М., Кононов И.И., Юсупов И.Е. Анализ данных пассивных грозопеленгационных систем в целях определения возможности совершенствования систем обеспечения безопасности от молниевых разрядов // Сб. трудов VII всероссийской конференции по атмосферному электричеству. - СПб, 2012. - Т. 1. - С. 150-151.

11. Кононов И.И., Иванов В.И., Крутой Д.М., Юсупов И.Е. Систематические ошибки местоопределения грозовых очагов // Сб. трудов XVII междунар. конф. "Радиолокация, навигация, связь". - Воронеж, 2011. - Т. 3. - С. 1990-2002.
12. Кононов И.И., Юсупов И.Е. К методике формирования банков канонических волновых форм сильноточных компонент молниевых вспышек // Сб. трудов Региональной XVII конф. по распространению радиоволн. - СПб, 2011. - С. 12-15.
13. Kononov I.I., Yusupov I.E., Zelinskiy I.S. Electromagnetic field models of high current lightnings // Proc. 20 Int. Conf. on Electromagnetic Disturbances. - Kaunas, 2010. - 4 p.
14. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Канонические волновые формы сильноточных компонент молниевых вспышек // Тезисы докладов региональной XVI конф. по распространению радиоволн. - СПб, 2010. - С. 165-168.
15. Кононов И.И., Крутой Д.М., Юсупов И.Е. Использование пассивных радиотехнических средств локации грозовых очагов для решения метеорологических задач // Сб. трудов 6 Рос. конф. по атм. электричеству. - Нижний Новгород, - 2007. - С. 227-228.
16. Kononov I.I., Ivanov V.I, Krutoy. D.M., Yusupov I.E. Some features of atmospherics waveforms transformation in the process of their propagation over the Earth and its influence on the accuracy of DTOA lightning location systems // Proc. Int. Lightning Detection Conf. - Tucson, 2006. - 6 p.
17. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Некоторые особенности пространственной структуры ЭМП внутриоблачных молниевых разрядов // Тез. докл. XI региональной конф. По распространению радиоволн - г. Санкт-Петербург, - 2005. - С. 84.
18. Kononov I.I., Yusupov I.E. Some meteorological aspects of lightning location systems using // Geophys. Res. Abstracts. - Vien, 2005. - Vol. 7, 06813. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-06813.
19. Igor I. Kononov, Igor E. Yusupov Cluster Analysis of Thunderstorm Development in Relation to Synoptic Patterns // Proc. 18 International Lightning Detection Conference. - Helsinki, 2004. - P. 1-9.

20. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Вариации параметров ЭМИ молниевых вспышек в процессе эволюции грозовых очагов // Сб. трудов 5 Рос. конф. по атм. электричеству. - Владимир, 2003. - Т. 1. - С. 305-308.
21. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Методы и алгоритмы кластеризации грозовых очагов // Сб. трудов 3 межд. конф. "Естественные и антропогенные аэрозоли". - СПб, 2001. - Т. 3. - С. 354-360.
22. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Современные методы пассивной локации гроз // Сб. трудов 3 межд. конф. "Естественные и антропогенные аэрозоли". - СПб, 2001. - Т. 3. - С. 350-354.
23. Kononov I.I., Petrenko I.A., Yusupov I.E. Space-temporal variations of electromagnetic radiation of thunder-Storms in the process of their evolution // Proc. 25 Int. Conf. on Lightning Protection. - Rhodes, 2000. - P. 145-150.
24. Kononov I.I., Borisov V.V., Usupov I.E. Space structure of electromagnetic field components for different types of lightning channels // Proc. 24 Int. Conf. on Lightning Protection. Birmingham, 1998. - P. 354-359.
25. Юсупов И.Е. Поляризационные ошибки рамочных пеленгаторов // I всероссийская научная конф. студентов-радиофизиков. - СПб, 1997.