



Кравченко Владимир Иванович, инженер-электрофизик, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Академик Академии наук прикладной радиозлектроники, руководитель национальной научной школы «Техника и электрофизика высоких напряжений», Председатель Технического Комитета Украины по стандартизации в области электромагнитной совместимости и стойкости радиозлектронных, электронных и электротехнических средств (ТК 22). Специалист в области электромагнитной совместимости радиозлектронных, электронных и электротехнических средств и молниезащиты объектов ракетно-космической техники и летательных аппаратов.



Князев Владимир Владимирович, физик, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ответственный секретарь Технического Комитета Украины по стандартизации в области электромагнитной совместимости и стойкости радиозлектронных, электронных и электротехнических средств (ТК-22). Специалист в области электромагнитной совместимости радиозлектронных, электронных и электротехнических средств, молниезащиты объектов ракетно-космической техники и летательных аппаратов.

В.И. Кравченко
В.В. Князев

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ Том 1



Министерство образования и науки Украины

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт «Молния»

Кравченко В.И., Князев В.В.

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Монография в трех томах

Под общей редакцией проф. В.И. Кравченко

Том 1

Природа грозových явлений

Харьков 2020

УДК 551.594.221
К78

Рецензенты:

А.А. Серков, д. т. н., проф., (проф. кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ»), Заслуженный изобретатель Украины;

Г.А. Маймур, к. т. н, главный научный сотрудник ГП «КБ «Южное», лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники;

И.И. Чернявский, заместитель начальника отдела комплектно-электронного оборудования и систем ГП «Антонов», лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники.

Публикуется по решению Ученого совета НТУ «ХПИ»
(Протокол № 6 от 13 ноября 2020 г.)

Кравченко В.И., Князев В.В.

К78 Молния и летательные аппараты. В 3-х томах, Том 1. Природа грозовых явлений / В.И.Кравченко, В.В. Князев. - Харьков: «НТМТ». 2020. – 253 с. – На рус. яз.

ISBN 978 - 617- 578 – 289 -7

Рассмотрены процессы формирования грозовых явлений и дана современная классификация видов молний. Содержатся материалы по определению параметров грозовой электромагнитной обстановки и номенклатуре внешних воздействующих факторов электромагнитного поля грозовых разрядов, оказывающих поражающие воздействия и дестабилизирующие влияния на летательные аппараты. Представлена информация о системах предупреждения о грозовой опасности и ее элементах.

Для инженерно-технических работников, разрабатывающих и эксплуатирующих летательные аппараты и студентов соответствующих специальностей. Также книга может быть полезна широкому кругу читателей.

Ил. 121. Табл. 17. Библ.: 141 наим.

ISBN 978 - 617- 578 – 289 -7

УДК 551.594.221

© В.И. Кравченко, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Введение.....	9
ГЛАВА 1 Грозовые разряды, их классификация и основные характеристики	13
1.1 Гроза как атмосферное явление	13
1.2 Кучево-дождевые облака	19
1.2.1 Виды кучево-дождевых облаков	21
1.2.2 Классификация и процессы формирования кучево-дождевых облаков, опасных для ЛА	22
1.2.3 Процессы формирования кучево-дождевых облаков опасных для ЛА	25
1.2.4 Стадии развития кучево-дождевых грозовых облаков	29
1.2.5 Физические характеристики кучево-дождевых грозовых облаков.....	35
1.2.6 Грозовые облака и воздушные суда	37
1.2.7 Электрические процессы в окружающем грозовое облако пространстве	39
1.3 Молниевые электрические разряды негрозового происхождения	49
1.4 Классификация грозовых разрядов	52
1.4.1 Огни святого Эльма.....	65
1.4.2 Линейная молния	66
1.4.3 Четочная молния	74
1.4.4 Шаровая молния	77
1.4.5 Сверхмолнии	82
1.4.6 Разряды молний не грозового происхождения.....	85
1.5 Линейные молнии.....	93
1.5.1 Наземные линейные молнии	93
1.5.1.1 Линейная молния отрицательной полярности	94
1.5.1.2 Линейная молния положительной полярности	101
1.5.2 Облачные разряды	103
1.5.3 Горизонтальные молнии	107
1.6 О природе шаровой молнии	111
Литература к главе 1.....	116

ГЛАВА 2 Грозовые электромагнитные факторы, оказывающие поражающие воздействия и дестабилизирующие влияния на летательные аппараты	118
2.1 Грозовая электромагнитная обстановка	118
2.1.1 Основные составляющие грозовой электромагнитной обстановки	118
2.1.2 Параметры тока нисходящей наземной молнии	122
2.1.2.1 Параметры тока нисходящей молнии отрицательной полярности	122
2.1.2.2 Параметры тока нисходящей молнии положительной полярности.....	129
2.1.2.3 Обобщенные максимальные статистические параметры тока молнии отрицательной и положительной полярности.....	131
2.1.3 Параметры тока облачной молнии	133
2.1.4 Параметры тока горизонтальной молнии	134
2.1.5 Обобщенные параметры грозовых электромагнитных полей линейных молний	134
2.2 Структура грозовых электромагнитных полей	142
2.2.1 Электрические поля предразрядного периода.....	142
2.2.2 Электромагнитные поля главной стадии разряда молнии	146
2.2.3 Параметры электромагнитных полей разрядов молнии «облако-земля» в ближней зоне	155
2.2.4 Параметры грозовой электромагнитной обстановки в аспектах обеспечения требований электромагнитной стойкости ТС наземных служб и стартовых комплексов ЛА	161
2.2.5 Параметры электромагнитных полей облачных разрядов	167
2.2.6 М-компоненты молний	170
2.2.7 Характерные особенности параметров электромагнитных полей молнии	176
2.3 Номенклатура и параметры внешних воздействующих факторов электромагнитного поля, сопровождающих грозовые разряды	188
Литература к главе 2	196

ГЛАВА 3 Мониторинг электромагнитной обстановки с целью обеспечения безаварийной эксплуатации летательных аппаратов в грозных условиях	201
3.1 Научно-технические основы системы раннего предупреждения грозной опасности эксплуатации летательных аппаратов	201
3.2 Средства измерения электростатического поля предгрозной обстановки в атмосфере Земли	211
3.3 Системы мониторинга грозной активности	214
3.4 Индикатор уровня напряженности электрического поля в атмосфере Земли	219
3.5 Предложения по созданию локальной системы предупреждения о грозной опасности	232
3.6 Оборудование раннего предупреждения грозной опасности	240
3.7 Компьютерная программа анализа и обработки данных при принятии решения о подаче сигнала грозной опасности Концепция построения алгоритма программы по использованию данных из одиночного пункта регистрации	245 246
Литература к главе 3	250

ПРЕДИСЛОВИЕ

Отношение к такому природному явлению как молния на протяжении существования человечества претерпело существенные изменения от поклонения божественным силам, до научных исследований, приведших к пониманию основных механизмов. Однако, по прошествии веков, не все особенности и закономерности молнии можно считать открытыми. В определенной мере, причина заключается в стохастическом характере этих процессов, что фактически, обуславливает неповторимость каждой реальной молнии. Вполне возможно, что это есть базовый принцип всех процессов, происходящих на Земле. Особенно научный интерес к физике молнии и ее деструктивному действию возрос за последние 20 лет, что есть вполне объяснимым. Повышение грозовой активности напрямую связано с проявлениями глобального потепления планетарного масштаба, являющегося, по мнению авторов, объективным процессом жизненного цикла Земли. Естественно, что увеличение числа гроз и их интенсивности привело к существенному увеличению числа катастрофических последствий грозových воздействий на окружающую среду, и людей. Наиболее часто ударам молнии подвергаются летательные аппараты, в том числе объекты ракетно-космической техники, самолеты и вертолеты. На основании результатов глобального мониторинга вносятся изменения в нормативные документы, регламентирующие параметры грозových электромагнитных эффектов. Следует отметить появление новых зарегистрированных видов грозových электрических явлений, которые еще не нашли должного описания в литературе: спрайты, синие джеты и эльфы. Кроме того, задачи, связанные с предупреждением о молниевой опасности и мониторингом молниевой активности, приобрели актуальность и некоторое нормативное обеспечение.

Этот трехтомник «Молния и летательные аппараты» задуман с целью систематизации данных об электромагнитных факторах грозových разрядов, оказывающих поражающее воздействие и дестабилизирующее влияние на летательные аппараты, а также описание методов и средств испытаний уровня устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов.

Ранее вышедшие книги И.С. Стекольников «Физика молнии и грозозащита» (1943 г), А. Милана «Физика молнии» (1963 г.), Б. Шонланда «Полет молнии» (1964 г.), М. Юмана «Молния» (1972 г.), Дж. Челмерса «Атмосферное электричество» (1974 г), Э.М. Базеляна и Ю.П Райзера «Физика молнии и молниезащита» (2001 г.), а также серия книг под редакцией Венона Курея (2008, 2010, 2012, 2015) содержат детальное описание физики молнии на момент их издания. В тоже время, в них не в полной мере отражены современные результаты исследований в этой области, особенно в части нормирования требований и реализации испытаний технических средств. Вышедшая в 2010 году монография В.И. Кравченко «Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства», была первой попыткой систематизировать разрозненные материалы исследований, связанных с испытаниями бортового оборудования летательных аппаратов, систем управления объектами энергетики, включая атомные электростанции, и других технических средств, содержащих в своей основе радиоэлектронное, электронное и электротехническое оборудование. В монографии были приведены методики и дано описание высоковольтного оборудования для проведения испытаний технических средств на соответствие требованиям по невосприимчивости к эффектам, сопровождающим молниевый разряд. За годы, прошедшие с момента публикации монографии, появилось большое число новых данных положенных в основу обновленных редакций базовых стандартов на испытания молниестойкости технических средств, обусловивших необходимость создания новых испытательных генераторов.

Представленный в настоящем трехтомнике материал содержит обобщение современных результатов исследований природы грозовых явлений (том 1), данные о поражающем воздействии и дестабилизирующем влиянии грозовых разрядов на летательные аппараты (том 2), требования, методики и результаты испытаний летательных аппаратов на молниестойкость (том 3) не является случайным. Харьковская научная школа техники и электрофизики высоких напряжений, руководителем которой в настоящее время является д.т.н., проф. В.И. Кравченко - один из соавторов трехтомника, традиционно специализировалась на исследованиях именно в этой области. Об этом свидетельствуют результаты сорокалетней плодотворной работы Научно-исследовательского и

проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»), сотрудниками которого являются авторы трехтомника, с Государственным предприятием «Конструкторское бюро «Южное» по методическому и практическому обеспечению молниестойкости разрабатываемых объектов ракетно-космической техники, а также с Государственным предприятием «Антонов» по проведению испытаний бортового оборудования и обшивки практически всех реализованных типов самолетов серии «АН».

Материалы монографии содержат обобщение результатов, которые были ранее опубликованы авторами и другими сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в различных научно-технических журналах, о чем указано в соответствующих ссылках.

Коллектив авторов выражает надежду, что представленный читателям трехтомник будет полезен не только специалистам в области проектирования, разработки и эксплуатации летательных аппаратов, но и интересен широкому кругу читателей.

Авторы с благодарностью примут критические замечания и пожелания, которые следует направлять по адресу: 61013, Украина, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» или на электронный ящик tc22@i.ua.

Коллектив авторов

ВВЕДЕНИЕ

Без преувеличения можно сказать, что в природе нет такого более величественного, загадочного, наводящего страх и притягивающего к себе, изучаемого и до сих пор полностью не познанного явления, как молния.

Молния представляет собой высокоэнергетический гигантский электрический искровой разряд, возникающий в атмосфере вследствие установления разности электрических потенциалов между ячейками внутри облака, между облаками и между облаком и землей, достигающих значений десятков и даже сотни миллионов вольт. Этот разряд обычно сопровождается яркой вспышкой света и мощным звуковым явлением - громом. Длина канала молний зависит от ряда факторов, в том числе от сформировавшейся разности потенциалов и условий распространения молнии. В европейской части длина канала нисходящей молнии облако-земля в среднем составляет 3 км, но может достигать десятков километров. Сила тока в канале молнии при ее разряде в землю носит статистический характер в диапазоне от 2 кА до 300 кА, с установленным средним значением 30 кА. В процессе трансформации электрической энергии в тепловую, температура в канале молнии достигает значений десятков тысяч градусов.

В основе грозовых явлений, несомненно, лежат электрические процессы в облаках. Электрическая природа молнии была раскрыта в исследованиях американского физика Б. Франклина, по идее которого, французом Далибаром 10 мая 1752 года был проведён первый опыт по извлечению электричества из грозового облака. Начало системного изучения природы молнии заложили в своих работах российские ученые М. Ломоносов и Г. Рихман (погиб 6 августа 1753 года во время экспериментального исследования молнии), создавшие первую теорию электризации облаков. Именно электрическая природа молнии с ее предельными параметрами является основой формирования электромагнитных факторов, оказывающих поражающее воздействие на летательные аппараты. Эти воздействия сопровождаются разрушениями термического и электродинамическими характера, а также опасными для функционирования технических средств, содержащих в своей основе радиоэлектронное, электронное и электротехническое

оборудование, последствиями, возникающими в результате электромагнитного излучения молнии.

К электромагнитным факторам грозовых разрядов, оказывающих поражающие воздействия и дестабилизирующие влияния на технические средства, и, прежде всего на летательные аппараты, относятся токи и напряжения молнии, электрические, магнитные и электромагнитные поля, сопровождающие грозовой разряд.

Из всей номенклатуры, составляющих основу и определяющих грозовую электромагнитную обстановку, как совокупность напряженностей электрических, магнитных, электромагнитных полей, токов и напряжений в рассматриваемой области, пожалуй, токи молнии изучены наиболее полно, а их амплитудно-временные параметры стандартизованы.

В отличие от токов молнии, пространственная структура электромагнитных полей грозовых разрядов и их амплитудно-временные параметры находятся в стадии изучения и обобщения. Прежде всего, это касается научно обоснованного и практически подтвержденного нормирования параметров внешних воздействующих факторов электромагнитного поля грозовых разрядов для проведения испытаний технических средств различного назначения на соответствие требованиям электромагнитной совместимости и стойкости к поражающим воздействиям и дестабилизирующим влияниям молнии. Сюда также относятся решение практически важных задач по определению критичности и основных причин восприимчивости тех или иных, конкретных видов технических средств, к вполне определенным видам поражающих факторов грозовых разрядов.

Представляемый читателю первый том трехтомника в какой-то мере решает эти проблемы. Так, в нем, на основе современных знаний дана уточненная классификация видов грозовых разрядов и их характеристик, определена номенклатура внешних воздействующих факторов молний и выявлены общие причины их поражающих воздействий на летательные аппараты.

За последние сто лет различные аспекты природы молнии, включая математические модели процессов и результаты наблюдений описаны в огромном числе научных публикаций, которые последовательно обобщались в объемных фундаментальных монографиях, написанных выдающимися

учеными: R.H. Golde, B. Schonland, J. Chalmers, M. Uman, Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер, V. Rakov, V. Cooray.

Авторы сочли уместным в конце этого раздела привести список публикаций, в которых, по нашему мнению, наиболее полно отражены результаты современных исследований. В том числе указан ряд стандартов, устанавливающих значения амплитудно-временных параметров электромагнитных факторов молнии, что важно для целей проведения соответствующих испытаний устойчивости технических средств. В определенном смысле, эти публикации являются базой, на которой построена современная практика молниезащиты.

В основу представленного в этом томе материала положены некоторые результаты, полученные авторами в области рассматриваемых вопросов, которые, по ряду причин, не нашли должного отражения в упомянутых выше публикациях. Авторы являются сотрудниками Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (Украина). Следует отметить, что основным направлением работы института является создание испытательных установок (имитаторов) электрофизических эффектов, сопровождающих молнию, и проведение испытаний уровня устойчивости технических средств к этим эффектам.

Поэтому, первая глава является творческим обобщением результатов наблюдений за природой формирования молнии, найденных в сети Интернет. Представленный обширный видеоряд позволяет читателю легко понять особенности формирования тех или иных видов облаков и различных видов электрических разрядов.

Во второй главе представлены результаты расчетной оценки амплитудно-временных параметров электрического и магнитного полей молнии в зависимости от расстояния точки наблюдения до канала молнии. Рассмотренная математическая модель построена с учетом эффекта изменения скорости движения возвратного тока по каналу молнии. Адекватность модели подтверждена путем сравнения с результатами современных измерений.

Учитывая, что целью данного научного труда является стремление авторов дать специализированную информацию о возможном влиянии молнии на летательные аппараты, ориентированную на новое поколение технических специалистов,

математические выкладки минимизированы. Во второе издание добавлена информация, опубликованная после выхода первого издания, а также некоторая дополнительная информация, которую авторы посчитали важной для полноты изложения.

В третьей главе рассмотрены аспекты, связанные с осуществлением мониторинга грозовой активности и систем предупреждения о молниевой опасности, разработанные в рамках научно-исследовательских работ, проведенных в институте по грантам Министерства образования и науки Украины в 2015 - 2016 годах.

Список литературы

B1. The Lightning Flash / Edited by Vernon Cooray // IET Power and Energy Series 34, UK, London: 2008, -600 p.

B2. Lightning protection / Edited by Vernon Cooray // IET Power and Energy Series 58, UK, London: 2010, 1070 p.

B3. Lightning Electromagnetics / Edited by Vernon Cooray // IET Power and Energy Series 62, UK, London: 2012, - 1020 p.

B4. Cooray V. An Introduction to Lightning / Springer Dordrecht Heidelberg New York London: 391 p.

B5. IEC 62305-1: 2010 Protection against lightning – Part 1: General principles.-72p.

B6. IEC 62305-2: 2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management.-82p.

B7. IEC 62305-3: 2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and live hazard. – 160 p.

B8. IEC 62305-4: 2010 Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures. -92 p.

B9. MIL STD 461G:2011 Department of Defense Interface Standard — Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment.- 280 p.

B10. STANAG 4370 AECTP 500:2016 Electromagnetic environmental effects test and verification. NATO Standardization Agency, 2016.-1125 p.

B11. ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. EUROCAE. – 438 p.

1.1 Грозы как атмосферное явление

Гроза - атмосферное явление, при котором внутри облаков, между облаками и земной поверхностью или между облаками и ионосферой возникают электрические разряды - *молнии*, зачастую сопровождаемые акустическим явлением - громом. Как правило, гроза образуется в мощных кучево-дождевых облаках и связана с ливневым дождём, градом и шквальным усилением ветра. Гроза - одно из самых опасных для человека явлений, связанных с погодой: по количеству зарегистрированных смертных случаев только внезапные наводнения приводят к бóльшим людским потерям¹. Особую опасность грозы представляют для объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов.

Грозное положение - синоптическая ситуация, характеризующаяся наличием мощной кучевой и кучево-дождевой облачности, но без грозы. При этом вероятность грозы составляет 30-40 %.

Процесс формирования грозовых явлений проходит три этапа: образование конвекционных облаков, их электризация и формирование грозовых разрядов – молний (рис. 1.1) [1.1-1.3].

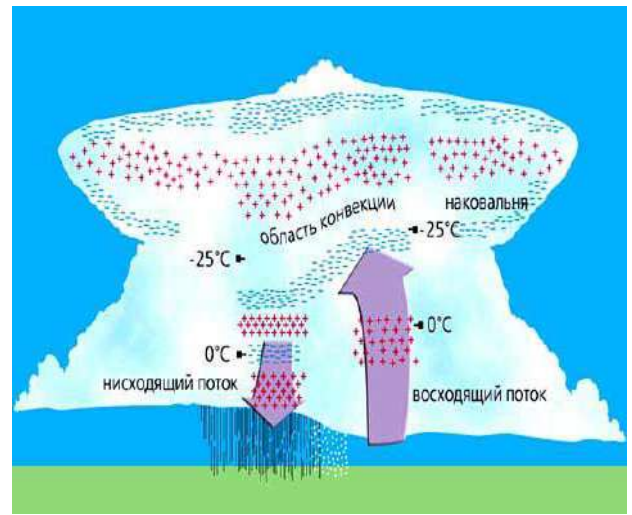
Первый этап связан с образованием кучево-дождевых облаков, которые развиваются в неустойчиво-стратифицированной атмосфере. Основную роль в образовании кучево-дождевых облаков играют процессы конвекции восходящих потоков влажного воздуха за счет интенсивного нагрева различной подстилающей водной или земной поверхности с последующей конденсацией в верхних слоях атмосферы содержащейся в нем влаги.

Конвективный подъем воздуха может быть и вынужденным, когда масса воздуха неустойчивой стратификации встречает горную преграду, чем объясняется часто наблюдаемые в летний период в горных районах ливневые осадки.

¹ [ru.wikipedia.org > wiki > Гроза](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гроза)



а)



б)



в)

Рис. 1.1 – Этапы процесса формирования грозовых явлений
 а – образование кучево-дождевых облаков;
 б – электризация облака [1.3];
 в – формирование грозовых разрядов – молний.

Когда кучевое облако достигает высот с температурой воздуха ниже минус 10-15°C, то в верхней части облака из конденсированной влаги образуются снежинки, и оно превращается в кучево-дождевое. Падая, снежинки проходят через слой с переохлажденными капельками воды и обрастают льдом. При свободном падении, проходя через большой слой воздуха с положительной температурой, снежинки, обросшие льдом, т.е. превратившиеся, по существу, в мелкие градины, тают и превращаются в капельки воды,

которые при падении сливаются, укрупняются и выпадают как ливневый дождь.

Второй этап процесса формирования грозовых явлений непосредственно связан с электризацией кучево-дождевых облаков. В кучево-дождевых облаках характерны струи восходящего воздуха. При большой неустойчивой стратификации атмосферы скорости восходящих струй могут достигать 10-20 м/с, в отдельных случаях скорости восходящих струй воздуха превышают 30-40 м/с, т. е. являются, по существу, ураганскими.

Поверхность земли обладает значительно большей электропроводностью, чем воздух. Однако, с высотой электропроводность воздуха возрастает. Воздух обычно заряжен положительно, а Земля отрицательно. Капли воды в грозовом облаке получают заряд за счет поглощения, находящихся в воздухе заряженных частиц (ионов) положительной и отрицательной полярности. В процессе завихрений в облаке капельки воды дробятся и разбрызгиваются. При этом, мелкие брызги получают отрицательный заряд, а крупные - положительный. То же происходит и с кристаллами льда в верхней части облака. При раскалывании их мелкие частицы льда приобретают отрицательный заряд и восходящими потоками уносятся в верхнюю часть облака, а крупные, заряженные положительно, опускаются в нижнюю часть облака.

В результате разделения зарядов непосредственно в грозовом облаке, а также в окружающем пространстве создаются электрические поля высокой напряженности. С накоплением в грозовом облаке больших объемных зарядов между отдельными частями облака или между облаком и земной поверхностью возникают искровые разряды (молнии), что соответствует *третьему – заключительному этапу грозового процесса*.

Одновременно на Земле действует около полутора тысяч гроз, средняя интенсивность разрядов оценивается как 100 молний в секунду. По поверхности планеты грозы распределяются неравномерно. Над океаном гроз наблюдается приблизительно в десять раз меньше, чем над континентами. В тропической и экваториальной зоне (от 30° северной широты до 30° южной широты) сосредоточено около 78 % всех молниевых разрядов. Максимум грозовой активности приходится на Центральную Африку и Южную Америку. Местами, где молнии встречаются чаще

всего, являются и деревня Кифука в горах на востоке Демократической Республики Конго. Там в среднем отмечается 250 и 158 ударов молний на квадратный километр в год [1.4]. В полярных районах Арктики и Антарктики над полюсами гроз практически не бывает. Естественно типичные грозы не происходят в пустынях. Интенсивность гроз следует за солнцем: максимум гроз приходится на лето (в средних широтах) и дневные послеполуденные часы. На грозы влияют также географические особенности местности: сильные грозовые центры находятся также в горных районах Гималаев и Кордильер.

Плотность ударов молний в землю N_G это число молний приходящиеся на квадратный километр в год. Исторически N_G определялось по грозовым дням или по данным счетчиков молний. Поскольку сегодня существуют более точные методы определения N_G , использовать грозовые дни или данные счетчиков молний больше не рекомендуется. В областях без наземных систем локации молний рекомендуемой оценкой плотности молний в землю является [1.5]:

$$N_G = 0,25 \times N_t$$

где N_t – суммарная плотность оптически регистрируемых молний на км^2 в год, полученная через вебсайт НАСА [1.6], например, представленную на рис. 1.2.

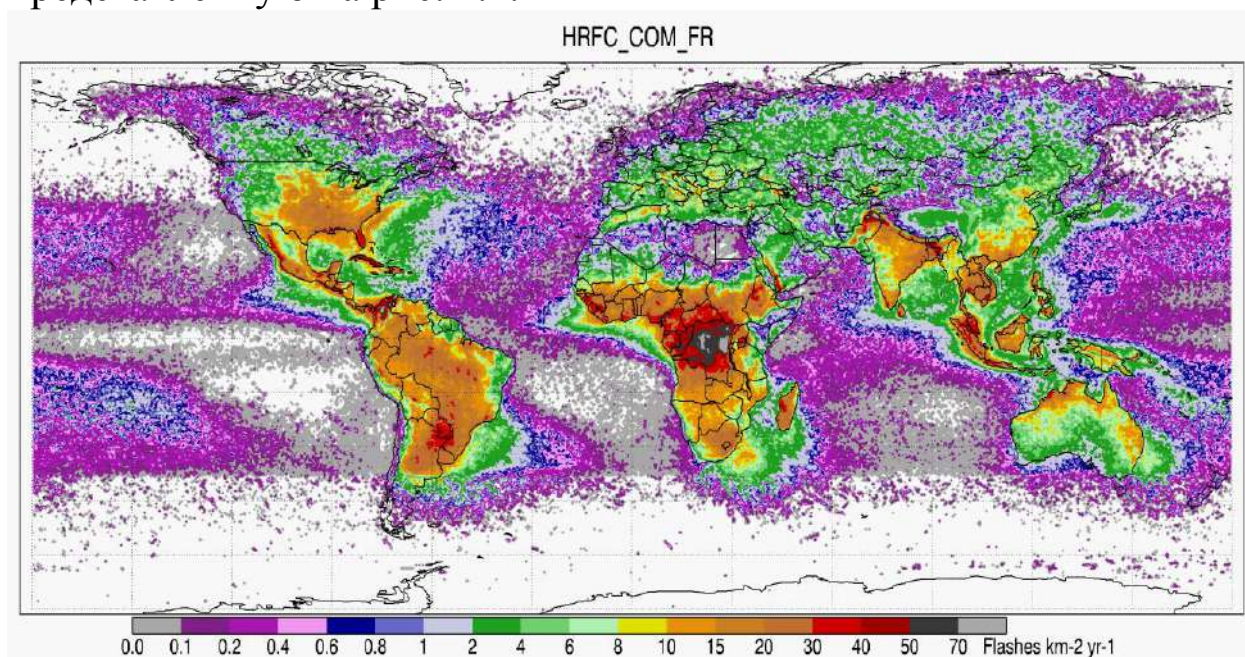


Рис. 1.2 – Распределение суммарной плотности оптически регистрируемых молний [1.6]

Карта грозовой активності на території України, представлена на рис. 1.3 [1.7], основана на даних отмененого ДСТУ Б В.2.5-38:2008, однак дає загальне представлення про розподіленні щільності ударів блискавки по регіонах. Значення середньої щільності ударів блискавки на квадратний кілометр території в теченні року оцінюється як 0,1 від числа грозових днів в році [1.8] або 0,067 від середньої тривалості гроз в годинах.

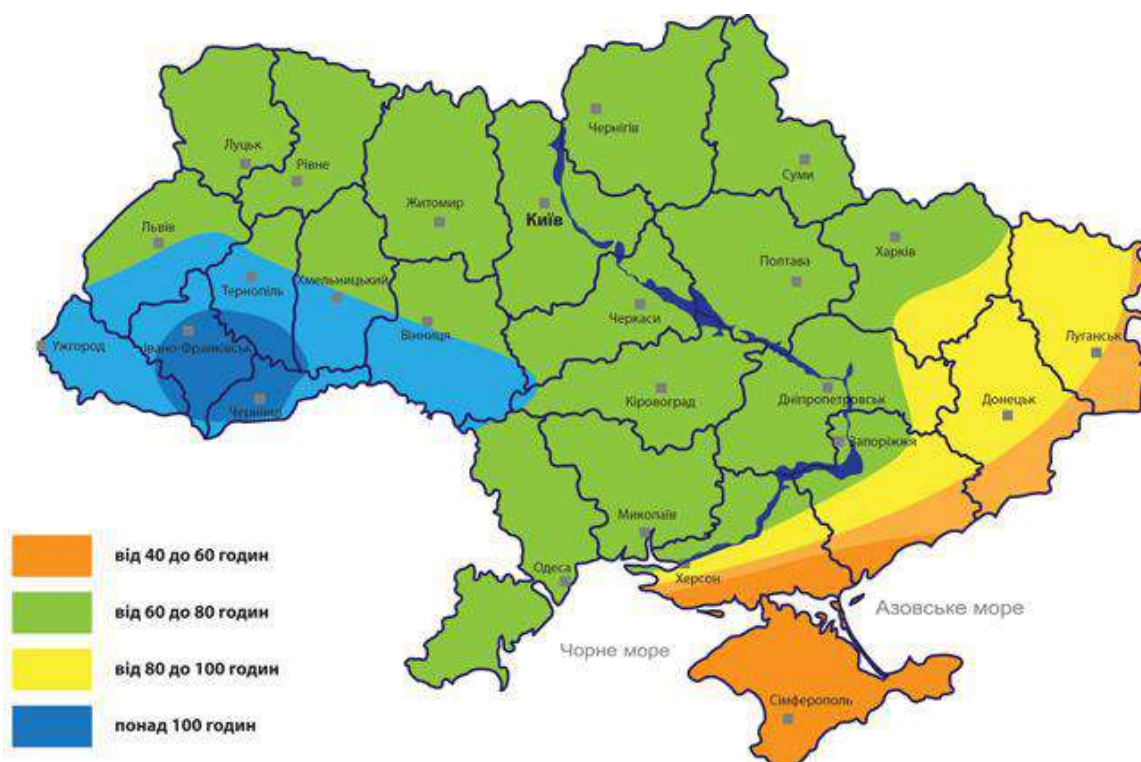


Рис. 1.3 – Карта грозовой активності в Україні [1.7].

Из представленной карты видно, что в Украине для значительной части территории, выделенной зеленым, наблюдается от 4 до 5,36 ударов молнии в квадратный километр в год. Аномальными районами с плотностью до $10 \text{ км}^{-1}\text{год}^{-1}$ являются район Измаила в Одесской области и район Ивано-Франковска.

Предвестниками гроз являются облака, появление которых не всегда связано с грозами.

Облака - взвешенные в атмосфере продукты конденсации водяного пара, видимые на небе невооруженным глазом с поверхности Земли и космического пространства. В широком смысле облако - это скопление отдельных частиц в определённом объёме.

Облака играют ключевую роль в радиационном режиме Земли, формируя одновременно альбедный и парниковый эффекты и сглаживая суточные и сезонные колебания температуры на Земле. Основные виды облаков и их распределение по высоте над поверхностью земли приведены на рис.1.4.²

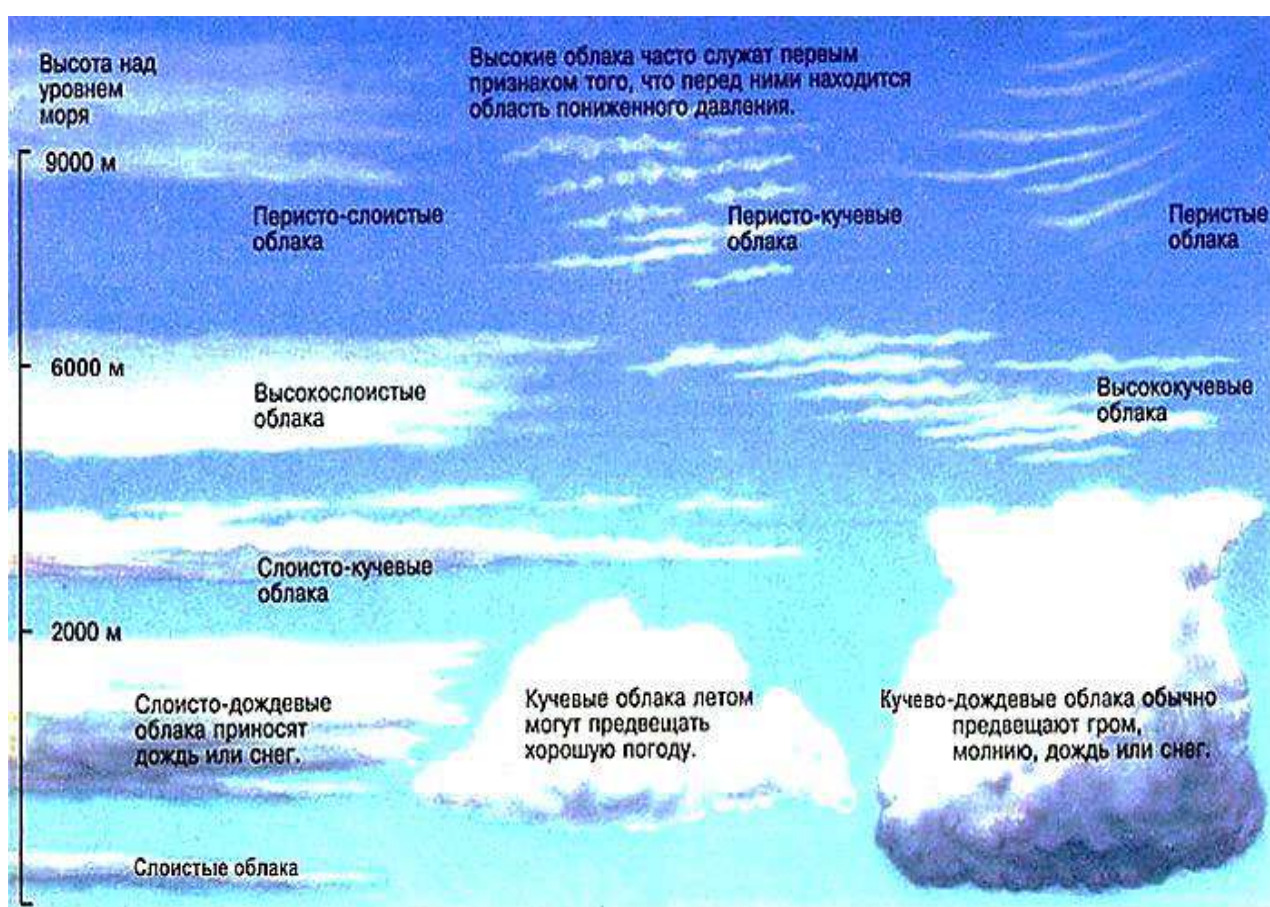


Рис. 1.4 – Виды облаков и их распределение в атмосфере земли.

² <https://ru.wikipedia.org/wiki/Облака>

Облака состоят из мельчайших капель воды и/или кристаллов льда (называемых облачными элементами). Капельные облачные элементы наблюдаются при температуре воздуха в облаке выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; от -10 до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ облака имеют смешанный состав (капли и кристаллы), а при температуре в облаке ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ — кристаллические.

При укрупнении облачных элементов в результате конденсации скорость их падения возрастает. Если скорость падения облачных элементов превысит скорость восходящего потока, они устремляются к поверхности земли и могут выпасть в виде осадков, если не успеют испариться по пути. Как правило, осадки выпадают из облаков, которые хотя бы в некотором слое имеют смешанный состав (кучево-дождевые, слоисто-дождевые, высокослоистые). Слабые морозящие осадки (в виде мороси, снежных зёрен или слабого мелкого снега) могут выпадать из однородных по составу облаков (капельных или кристаллических) — слоистых, слоисто-кучевых.


Проявление грозы, как атмосферного явления, непосредственно связано с образованием *кучево-дождевых (грозовых) облаков*.

Необходимыми условиями для возникновения такого вида облаков является наличие, как необходимого условия для развития, конвекции или иного механизма, создающего восходящие потоки запаса влаги, достаточного для образования осадков, и наличия структуры, в которой часть облачных частиц находится в жидком состоянии, а часть — в ледяном.

1.2 Кучево-дождевые облака

Кучево-дождевые облака (ливневые облака, грозовые облака) — хорошо развитые по вертикали конвективные облака в виде плотной массы с тёмно-серым или чёрным основанием, под которым видны полосы падения осадков (вирга). Данный вид облаков является наиболее опасным с точки зрения формирования грозовых явлений опасных для эксплуатации летательных аппаратов — молний, восходящих и нисходящих потоков, шквалов и турбулентностей.

Кучево-дождевые облака развиваются из кучевых облаков, отличаясь от них верхней частью, находящейся на уровнях атмосферы с температурой воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и состоящей из ледяных кристаллов, и поэтому имеющей нечёткие границы.

По международной классификации кучево-дождевые облака называются лат. *Cumulonimbus* (Cb). На картах погоды наиболее развитые кучево-дождевые облака (с наковальнями) обозначаются символом ³.

С этими облаками связаны осадки (в жаркую погоду они могут не достигать поверхности земли, испаряясь в подоблачном слое), в ряде случаев шквалистый ветер, грозы, град. Период жизни этих облаков сравнительно короткий - от 30-40 минут до 3-4 часов.

Нижняя граница кучево-дождевых облаков зимой находится обычно на уровне 300—600 м, летом — 600—1200 м, а в сухих регионах (степи, пустыни) и в жаркую погоду может подниматься до 1500—2000 м, иногда (при особенно малой влажности воздуха) и до 3—5 км (в этом случае с кучево-дождевыми облаками может быть связано такое опасное для авиации явление, как микрошквал).

В тёплое время года вершина облака может достигать тропопаузы, а в холодный сезон, когда конвекция выражена слабее, облака более плоские. Обычно облака не образуют сплошного покрова, но часто маскируются в сплошных слоисто-кучевых или высоко-слоистых облаках. При прохождении холодного фронта кучево-дождевые облака могут формировать вал. Солнце сквозь кучево-дождевые облака не просвечивает. При выпадении ливневого дождя часто наблюдается радуга.

Кучево-дождевые облака образуются при неустойчивости воздушной массы, когда происходит активное восходящее движение воздуха. Эти облака часто образуются на атмосферных фронтах, особенно на холодном фронте, наиболее часто — в тёплый период года (вторая половина весны, лето, первая половина осени).

³ [ru.wikipedia.org > wiki > Куч.](http://ru.wikipedia.org/wiki/Куч)

1.2.1 Виды кучево-дождевых облаков ⁴



Cumulonimbus – кучево-дождевые облака (Cb) формируются в процессе дальнейшей эволюции кучевых облаков (Cu. Cong.). Это более массивные, сильно развитие по вертикали облака. Наличие грома, молний и наковален говорит о том, что перед нами Cb.



Cumulonimbus calvus – это умеренно развитые по вертикали кучево-дождевые облака (Cumulonimbus), но еще не достигшие той высоты, где вершина облака приобретает вид наковальни (*Cumulonimbus incus*). Похожи на Cu. cong, но более развиты по вертикали. Основание такого облака может

⁴ [Meteoweb.ru](http://meteoweb.ru)

быть шире, чем остальная его часть. Не обязательно дает грозы, но при условии ослабления восходящих потоков могут давать ливневые осадки.



Cumulonimbus capillatus – это Cb с «наковальнями» (incus) с или без выброса перистой облачности (Ci). С Cu cap обычно связаны грозы, град, шквалы, ливневые осадки. Cumulonimbus incus (incus с латинского – «наковальня») – это кучево-дождевое облако (Cumulonimbus, Cb), достигшее высоты изотермии на границе тропосферы и стратосферы. Восходящие потоки воздуха не могут преодолеть блокирующий слой изотермии, поэтому начинается растекание облака по направлению преобладающего потока воздуха в горизонтальном направлении. Таким образом, формируется характерная «наковальня» в верхней части Cb. Однако сильные вертикальные потоки воздуха иногда могут «пробить» слой изотермии. Тогда кучево-дождевое облако (Cb) на своей вершине имеет округлую ледяную «шапочку» (pileus). Форма этой «шапочки» быстро изменяется во времени. По сути, pileus – это небольшое ледяное облако над кучевым (Cu) или кучево-дождевым (Cb) облаком (не обязательно в нижней стратосфере, но и на более низких уровнях тропосферы). Появление pileus свидетельствует о том, что в атмосфере господствуют сильные восходящие потоки, а воздух достаточно влажен, чтобы дать толчок к развитию грозных штормов.

1.2.2 Классификация и процессы формирования кучево-дождевых облаков, опасных для ЛА

Грозы могут формироваться и развиваться в любом географическом месте земли, но чаще всего их формирование характерно для средних широт, где теплый и влажный воздух

тропических широт сталкивается с холодным воздухом полярных широт.

В зависимости от величины и мощности таких потоков формируются грозовые облака различных типов. В этих аспектах грозовые облака можно разделить на 3 типа⁵: *одноячейковые*, *мультиячейковые* и *суперъячейковые*.

Одноячейковые



Явление носит слабо выраженный характер. Объем облака 5500 км^3 - толщиной (вертикальной протяжённостью) от 1—2 км (зимой) и до 3—4 км (летом), диаметром 1—3 км, средняя длина облака 13 км. С ними связаны кратковременные со средней частотой повторения молний 3 мин, ливневые осадки, иногда слабые грозы. Это единственный класс кучево-дождевых, которые бывают зимой в умеренных широтах.

Мультиячейковые



Облака данного типа подразделяются на *кластерные* и *линейные* — по сути, состоят из множества ячеек (каждая из которых идентична одноячейковому облаку), слившихся в общее скопление (кластер), у которого формируется единая наковальня сверху. Объем облака 12500 км^3 - диаметр такого скопления (кластера) — около 10-15 км и толщина 7-10 км. С ними связаны

⁵ <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Облака&veaction=edit§ion=0>

интенсивные ливни, грозы, шквалы, иногда град. Это самый часто наблюдаемый класс кучево-дождевых облаков в средних широтах летом, а также они встречаются, но реже весной и осенью. Грозы, возникающие при таком типе облаков, самые частые, однако характеризуются не очень большой силой. *Линейный кластерный* тип облаков имеет объем 10000 км^3 с длиной облака до 18 км и частотой повторения молний 5 мин. Отличается наличием мощных хотя и не особенно сильных порывов ветра, сопровождающих грозовые явления.

Суперъячейковые



Представляют собой облако, состоящее из одной ячейки объемом 65000 км^3 с диаметром порядка 50 км, толщина — 10-15 км (нередко проникающей в стратосферу) с единой полукруглой наковальней. С суперъячейкой связана целая система вертикальных и горизонтальных движений воздуха и небольшое барическое возмущение — мезоциклон. Суперъячейки обуславливают сильнейшие грозы и ливни, шквалы, град,

зачастую торнадо (смерчи). В средних широтах отмечаются редко (в отдельно взятом пункте не ежегодно). Частотой повторения молний 20 мин. Для формирования суперъячейкового облака необходимы очень сильная конвективная неустойчивость воздуха (при этом обычно температура воздуха у земли (до грозы) составляет $+27...+30 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше) и мощное струйное течение в верхней тропосфере, резкое усиление скорости ветра с высотой и некоторый поворот его - большие вертикальные сдвиги ветра способствуют завихренности поднимающегося потока и образованию мезоциклона. Таким образом, благоприятен для формирования суперъячейки тёплый сектор циклона недалеко перед холодным фронтом, вблизи оси высотной фронтальной зоны и соответствующего ей струйного течения.

1.2.3 Процессы формирования кучево-дождевых облаков опасных для ЛА

Одноячейковое грозовое облако. Одноячейковые кучево-дождевые (*Cumulonimbus*, Cb) облака развиваются в дни со слабым ветром в малоградиентном барическом поле (рис.1.5).

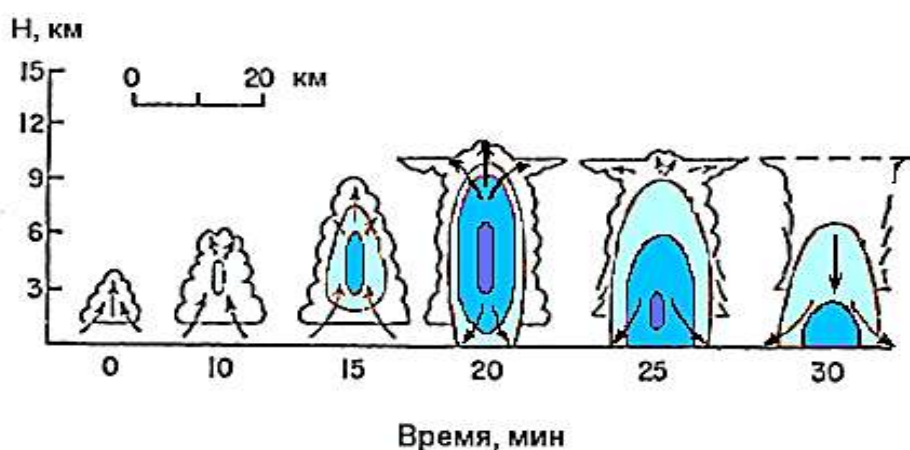


Рис. 1.5 - Цикл жизни одноячейкового облака

Их называют ещё внутримассовыми или локальными. Они состоят из конвективной ячейки с восходящим потоком в центральной своей части, могут достигать грозовой и градовой интенсивности и быстро разрушаться с выпадением осадков.

Размеры такого облака: поперечный – 5-20 км, вертикальный – 8-12 км, продолжительность жизни — около 30 минут, иногда — до 1 часа. Серьёзных изменений погоды после грозы не происходит.

Формирование облачности начинается с возникновения кучевого облака хорошей погоды (*Cumulus humilis*). При благоприятных условиях возникшие кучевые облака быстро растут как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, при этом восходящие потоки находятся почти по всему объёму облака и увеличиваются от 5 м/с до 15-20 м/с. Нисходящие потоки очень слабы. Окружающий воздух активно проникает внутрь облака за счёт смещения на границе и вершине облака. Облако переходит в стадию средних кучевых (*Cumulus mediocris*). Образующиеся в результате конденсации мельчайшие водяные капли в таком облаке сливаются в более крупные, которые уносятся мощными восходящими потоками вверх. Облако ещё однородное, состоит из капель воды, удерживаемых восходящим потоком, — осадки не

выпадают. В верхней части облака при попадании частиц воды в зону отрицательных температур капли постепенно начинают превращаться в кристаллы льда. Облако переходит в стадию мощного кучевого облака (*Cumulus congestus*). Смешанный состав облака приводит к укрупнению облачных элементов и созданию условий для выпадения осадков и образования грозовых разрядов. Такое облако называют кучево-дождевым (*Cumulonimbus*) или (в частном случае) кучево-дождевым лысым (*Cumulonimbus calvus*). Вертикальные потоки в нём достигают 25 м/с, а уровень вершины достигает высоты 7—8 км. Испаряющиеся частицы осадков охлаждают окружающий воздух, что приводит к дальнейшему усилению нисходящих потоков. На стадии зрелости в облаке одновременно присутствуют и восходящие, и нисходящие воздушные потоки. На стадии распада в облаке преобладают нисходящие потоки, которые постепенно охватывают все облако.

Многоячейковые кластерные облака. Это наиболее распространённый тип облаков и гроз, связанный с мезомасштабными (имеющими масштаб от 10 до 1000 км) возмущениями.

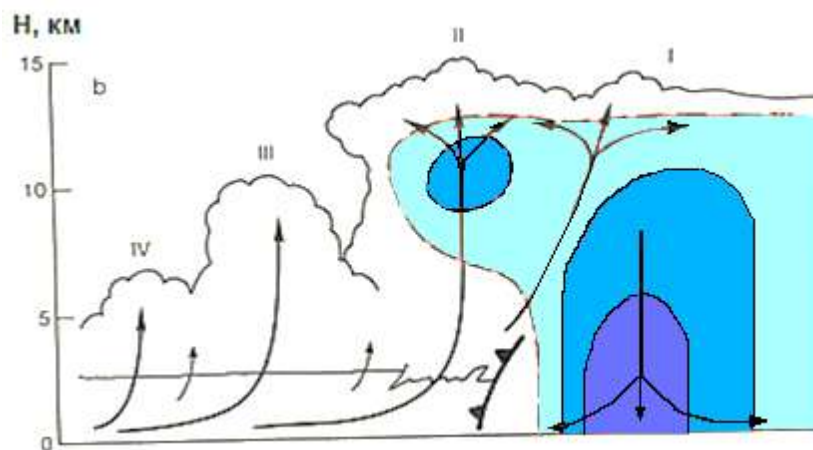


Рис. 1.6 - Схема многоячейковой грозовой структуры

Многоячейковый кластер состоит из группы грозовых ячеек,двигающихся как единое целое, хотя каждая ячейка в кластере находится на разных стадиях развития грозового облака. Грозовые ячейки, находящиеся в стадии зрелости, обычно располагаются в

центральной части кластера, а распадающиеся ячейки — с подветренной стороны кластера. Они имеют поперечные размеры 20—40 км, их вершины нередко поднимаются до тропопаузы и проникают в стратосферу. Многоячейковые кластерные грозы могут давать град, ливневые дожди и относительно слабые шквальные порывы ветра. Каждая отдельная ячейка в многоячейковом кластере находится в зрелом состоянии около 20 минут; сам многоячейковый кластер может существовать в течение нескольких часов. Данный тип грозы обычно более интенсивен, чем одноячейковая гроза, но много слабее суперъячейковой грозы.

Многоячейковые линейные грозы (линии шквалов). Многоячейковые линейные грозы представляют собой линию гроз с продолжительным, хорошо развитым фронтом порывов ветра на передней линии фронта. Линия шквалов может быть сплошной или содержать бреши. Приближающаяся многоячейковая линия выглядит как тёмная стена облаков, обычно покрывающая горизонт с западной стороны (в северном полушарии). Большое число близко расположенных восходящих/нисходящих потоков воздуха позволяет квалифицировать данный комплекс гроз как многоячеечный, хотя его грозовая структура резко отличается от многоячейковой кластерной грозы. Линии шквалов могут давать крупный град (диаметром более 2 см) и интенсивные ливни, но больше они известны как системы, создающие сильные нисходящие потоки и сдвиги ветра, опасные для авиации. Линия шквалов близка по свойствам к холодному фронту, но является локальным результатом грозовой деятельности. Часто линия шквалов возникает впереди холодного фронта. На радарных снимках эта система напоминает изогнутый лук. Данное явление характерно для Северной Америки, на территории Европы наблюдается реже.

Суперъячейковые облака. Это наиболее высокоорганизованное грозовое облако. Суперъячейковые облака относительно редки, но представляют наибольшую угрозу для здоровья и жизни человека, и его имущества.

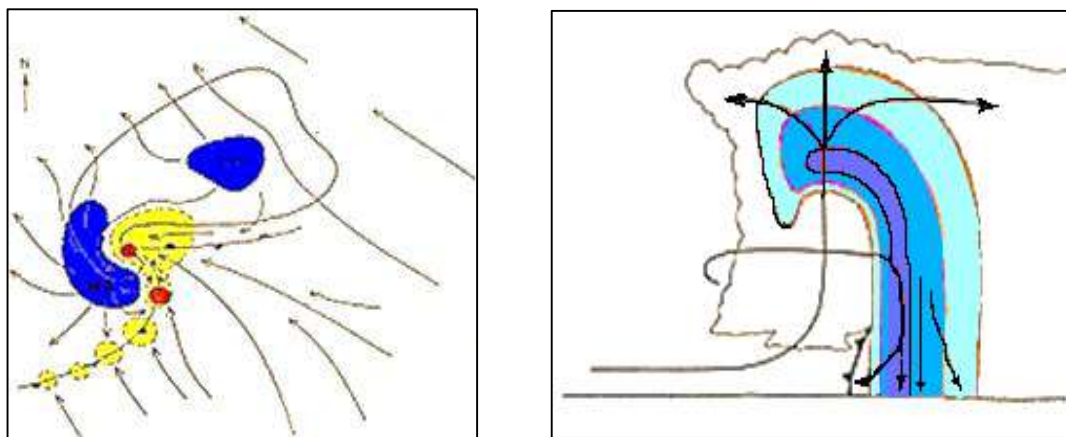


Рис. 1.7 - Горизонтальная и вертикальная структуры супер ячейкового облака

Суперъячейковое облако схоже с одноячейковым тем, что оба имеют одну зону восходящего потока. Различие состоит в размере супер ячейки: диаметр порядка 50 км, высота — 10—15 км (нередко верхняя граница проникает в стратосферу) с единой полукруглой наковальной. Скорость восходящего потока в суперъячейковом облаке значительно выше, чем в других типах грозовых облаков: до 40—60 м/с. Основной особенностью, отличающей суперъячейковое облако от облаков других типов, является наличие вращения. Вращающийся восходящий поток в суперъячейковом облаке (в радарной терминологии называемый мезоциклоном) создаёт экстремальные по силе погодные явления, такие, как крупный град (диаметром 2—5 см, иногда и более), шквалы со скоростью до 40 м/с и сильные разрушительные смерчи. Окружающие условия являются основным фактором в образовании суперъячейкового облака. Необходима очень сильная конвективная неустойчивость воздуха. Температура воздуха у земли (до грозы) должна быть +27...+30 °С и выше, но главным необходимым условием является ветер переменного направления, вызывающий вращение. Такие условия достигаются при сдвиге ветра в средней тропосфере. Осадки, образующиеся в восходящем потоке, переносятся по верхнему уровню облака сильным потоком в зону нисходящего потока. Таким образом, зоны восходящего и нисходящего потоков оказываются разделёнными в пространстве, что обеспечивает жизнь облака в течение длительного периода времени. Обычно на передней кромке суперъячейкового облака наблюдается слабый дождь. Ливневые осадки выпадают вблизи

зоны восходящего потока, а наиболее сильные осадки и крупный град выпадают к северо-востоку от зоны основного восходящего потока (в Северном полушарии). Наиболее опасные условия наблюдаются неподалёку от зоны основного восходящего потока (обычно смещённые к задней части грозы).

1.2.4 Стадии развития кучево-дождевых грозовых облаков

Необходимыми условиями для возникновения кучево-дождевого грозового облака является наличие процессов конвекции или иного механизма, создающих восходящие потоки воздуха, запаса в нем влаги, достаточного для образования осадков, а также наличия структуры, в которой часть облачных частиц находится в жидком состоянии, а часть в кристаллическом (ледяном).

Конвекция, приводящая к развитию гроз, возникает в следующих случаях [1.1-1.3, 1.9-1.11]:

- при неравномерном нагревании приземного слоя воздуха над различной подстилающей поверхностью, например, над водной поверхностью и сушей из-за различий в температуре воды и почвы. Над крупными городами интенсивность конвекции значительно выше, чем в окрестностях города;
- при подъеме или вытеснении теплого воздуха холодным на атмосферных фронтах. Атмосферная конвекция на атмосферных фронтах значительно интенсивнее и чаще, чем при внутримассовой конвекции. Часто фронтальная конвекция развивается одновременно со слоисто-дождевыми облаками и обложными осадками, что маскирует образующиеся кучево-дождевые облака;
- при подъеме воздуха в районах горных массивов. Даже небольшие возвышенности на местности приводят к усилению образования облаков (за счет вынужденной конвекции). Высокие горы создают особенно сложные условия для развития конвекции и, почти всегда, увеличивают ее повторяемость и интенсивность.

Грозы обычно подразделяются на два основных типа: *внутримассовые* и *фронтальные*. Наиболее часто встречающимися грозами являются внутримассовые (местные) грозы, возникающие вдали от фронтальных зон и обусловленные особенностями местных воздушных масс. Продолжительность таких гроз невелика и составляет, как правило, не более одного часа. Местные грозы могут

быть связаны с одной или несколькими ячейками кучево-дождевых облаков. В этой связи можно выделить три этапа зарождения грозовых облаков (рис. 1.8):

- *формирование кучевой облачности* и ее развитие вследствие неустойчивости местной воздушной массы и конвекции с последующим формированием кучево-дождевой облачности;

- *максимальная фаза развития кучево-дождевого облака*, когда наблюдаются наиболее интенсивные осадки, шквалистый ветер во время прохождения грозового фронта, а также наиболее сильная гроза (для этой фазы также характерны интенсивные нисходящие движения воздуха);

- *заключительная стадия существования грозы* (разрушение кучево-дождевой облачности, уменьшение интенсивности осадков и грозы вплоть до их прекращения).

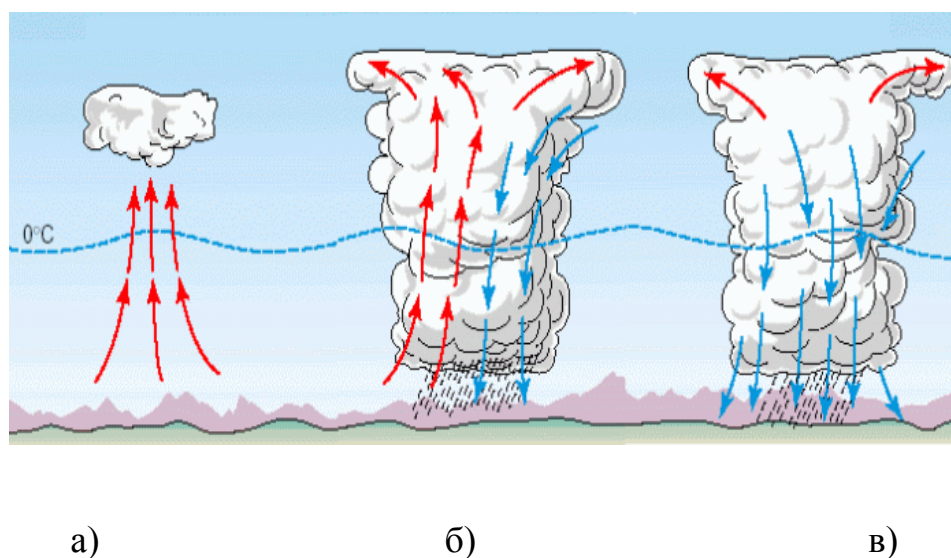


Рис. 1.8 – Стадии развития грозовых облаков (meteoweb.ru/phen001.php)

а – начальная стадия формирования грозы (появление кучевой облачности);

б – максимальная фаза развития кучево-дождевого облака;

в – заключительная фаза существования грозы

Формирование кучевой облачности, как правило, происходит в первой половине жаркого летнего дня (около десяти часов утра местного времени), когда на небе появляются кучевые облака, предвестники начала зарождения грозы. Летнее Солнце с момента своего восхода при малооблачной погоде прогревает земную поверхность и, как следствие, приземный воздух. При

неустойчивости атмосферы прогретый солнечными лучами приземный воздух становится менее плотным и начинает подниматься вверх. Поднимаясь вверх, воздух адиабатически охлаждается, достигая определенной температуры, при которой начинается конденсация влаги, содержащейся в нем. Начинается формирование и развитие грозных облаков (рис. 1.9).



Рис. 1.9 - Этап формирования кучевой облачности

Процесс конденсации влаги сопровождается выделением тепловой энергии, достаточной для дальнейшего подъема воздуха. При этом происходит развитие кучевого облака по вертикали. Скорость вертикального развития может составлять от 5 до 20 м/с, поэтому верхняя граница образуемого кучево-дождевого облака может достигать 8 – 10 километров над поверхностью земли. Таким образом, в течение примерно 7 минут кучевое облако может увеличиться до высот порядка 10 км и превратиться в кучево-дождевое облако.

Как только растущее по вертикали кучевое облако миновало на определенной высоте нулевую изотерму, в его составе начинают появляться кристаллы льда, хотя общее количество капель (уже переохлажденных) доминирует. При этом, даже при температурах минус 40 градусов в облаке могут встречаться переохлажденные

капли воды. В этот же момент начинается процесс формирования осадков. Как только начинается выпадение осадков из облака, начинается вторая стадия развития грозового облака.

Максимальная фаза развития грозового облака. На этой стадии кучево-дождевое облако достигло своего максимального вертикального развития, что соответствует возникновению «запирающего» слоя более стабильного воздуха – *тропопаузы*. Поэтому на смену вертикальному развитию, вершина облака начинает развиваться в горизонтальном направлении (рис. 1.10).



Рис. 1.10 – Максимальная фаза развития грозового облака
(meteoweb.ru/phen001.php)

При этом появляется так называемая «наковальня», представляющая собой перистые облака, состоящие уже из ледяных кристаллов. В самом же облаке конвективные потоки формируют восходящие потоки воздуха (от основания к вершине облака), а осадки становятся причиной потоков, нисходящих (направленных от вершины облака к его основанию, а потом и вовсе к земной поверхности).

Осадки охлаждают прилегающий к ним воздух, порой на 10 градусов. Воздух становится плотнее, а его падение к поверхности земли усиливается и становится более стремительным.



Рис. 1.11 – Зрелый этап кучево-дождевой облачности

В такой момент, обычно в первые минуты ливня, у земли могут наблюдаться шквалистые усиления ветра, опасные для авиации и способные причинить значительные разрушения. Именно их иногда ошибочно называют «смерчем» при отсутствии настоящего смерча. В это же время наблюдается наиболее интенсивная гроза, сопровождающаяся разрядами молний.

Молния — электрический искровой разряд, проявляющийся, обычно, яркой вспышкой света и сопровождающим её громом. Это высокоэнергетический электрический разряд, возникающий вследствие установления разности электрических потенциалов (иногда до нескольких миллионов вольт) между поверхностями облачных покровов и (или) облачного покрова и земли. Одновременно с разрядами молний происходит выпадение осадков, что приводит к преобладанию нисходящих потоков воздуха в грозовом облаке. При этом наступает третья, заключительная стадия развития грозы - разрушение грозового облака.

Разрушение грозового облака. На смену восходящим потокам воздуха в кучево-дождевом облаке приходят нисходящие потоки, тем самым, перекрывая доступ теплого и влажного воздуха, отвечающего за вертикальное развитие облака. Грозовое облако полностью разрушается, а на небе остается лишь абсолютно бесперспективная с точки зрения формирования грозового шторма «наковальня», состоящая из перистых облаков (рис. 1.12).



Рис. 1.12 - Этап разрушения кучево-дождевой грозовой облачности

Обычно внутримассовые грозы связаны с одной ячейкой, хотя бывают и мультячейковые внутримассовые грозы. При мультячейковой грозовой деятельности нисходящие потоки холодного воздуха «материнского» облака создают восходящие потоки, формирующие «дочернее» грозовое облако. Таким образом, может сформироваться серия ячеек.

1.2.5 Физические характеристики кучево-дождевых грозовых облаков

Самолётные и радарные исследования показывают, что единичная грозовая ячейка обычно достигает высоты порядка 8—10 км и живёт порядка 30 минут. Изолированная гроза обычно состоит из нескольких ячеек, находящихся в различных стадиях развития, и длится порядка часа. Крупные грозы могут достигать в диаметре десятков километров, их вершина может достигать высоты свыше 18 км, и они могут длиться много часов.

Восходящие и нисходящие потоки в изолированных грозах обычно имеют диаметр от 0,5 до 2,5 км и высоту от 3 до 8 км. Иногда диаметр восходящего потока может достигать 4 км. Вблизи поверхности земли потоки обычно увеличиваются в диаметре, а скорость в них падает по сравнению с выше расположенными потоками. Характерная скорость восходящего потока лежит в диапазоне от 5 до 10 м/с и доходит до 20 м/с в верхней части крупных гроз. Исследовательские самолёты, пролетающие сквозь грозовое облако на высоте 10 000 м, регистрируют скорость восходящих потоков свыше 30 м/с. Наиболее сильные восходящие потоки наблюдаются в организованных грозах.

Шквалы. В некоторых грозах возникают интенсивные нисходящие воздушные потоки, создающие на поверхности земли ветер разрушительной силы. В зависимости от размера такие нисходящие потоки называются шквалами или микрошквалами. Шквал диаметром более 4 км может создавать ветер до 60 м/с. Микрошквалы имеют меньшие размеры, но создают ветер скоростью до 75 м/с. Если порождающая шквал гроза образуется из достаточно тёплого и влажного воздуха, то микрошквал будет сопровождаться интенсивным ливневым дождём. Однако, если гроза формируется из сухого воздуха, осадки во время выпадения могут испариться, и микрошквал будет сухим. Нисходящие воздушные потоки являются серьёзной опасностью для самолётов, особенно во время взлёта или посадки, так как они создают вблизи земли ветер с сильными внезапными изменениями скорости и направления.

Вертикальное развитие. В общем случае, активное конвективное облако будет подниматься до тех пор, пока оно не утратит плавучесть. Потеря плавучести связана с нагрузкой, создаваемой

образовавшимися в облачной среде осадками, или смешением с окружающим сухим холодным воздухом, или комбинацией этих двух процессов. Рост облака также может быть остановлен слоем блокирующей инверсии, то есть слоем, где температура воздуха растёт с высотой. Обычно грозовые облака достигают высоты порядка 10 км, но иногда достигают высот более 20 км. Когда влагосодержание и неустойчивость атмосферы высоки, то при благоприятном ветре облако может вырасти до тропопаузы, слоя, отделяющего тропосферу от стратосферы.

Тропопауза характеризуется температурой, остающейся приблизительно постоянной с ростом высоты и известной как область высокой стабильности. Как только восходящий поток начинает приближаться к стратосфере, то довольно скоро воздух в вершине облака становится холоднее и тяжелее окружающего воздуха, и рост вершины останавливается. Высота тропопаузы зависит от широты местности и от сезона года. Она варьируется от 8 км в полярных регионах до 18 км и выше вблизи экватора.

Когда кучевое конвективное облако достигает блокирующего слоя инверсии тропопаузы, оно начинает растекаться в стороны и образует характерную для грозовых облаков «наковальню». Ветер, дующий на высоте наковальни, обычно сносит облачный материал по направлению ветра.

Турбулентности. Самолёт, пролетающий сквозь грозовое облако (залетать в кучево-дождевые облака запрещается), обычно попадает в болтанку, бросающую самолёт вверх, вниз и в стороны под действием турбулентных потоков облака. Атмосферная турбулентность создаёт ощущение дискомфорта для экипажа самолёта и пассажиров и вызывает нежелательные нагрузки на самолёт. Турбулентность измеряется разными единицами, но чаще её определяют в единицах g - ускорения свободного падения ($1g = 9,8 \text{ м/с}^2$). Шквал в один g создаёт опасную для самолётов турбулентность. В верхней части интенсивных гроз зарегистрированы вертикальные ускорения до трёх g .

Движение грозовых облаков. Скорость и движение грозового облака зависит от направления ветра, прежде всего, взаимодействия восходящего и нисходящего потоков облака с несущими воздушными потоками в средних слоях атмосферы, в которых развивается гроза. Скорость перемещения изолированной грозы

обычно порядка 20 км/ч, но некоторые грозы двигаются гораздо быстрее. В экстремальных ситуациях грозовое облако может двигаться со скоростями 65—80 км/ч — во время прохождения активных холодных фронтов. В большинстве гроз по мере рассеивания старых грозовых ячеек последовательно возникают новые грозовые ячейки. При слабом ветре отдельная ячейка за время своей жизни может пройти совсем небольшой путь, меньше двух километров; однако в более крупных грозах новые ячейки запускаются нисходящим потоком, вытекающим из зрелой ячейки, что создаёт впечатление быстрого движения, не всегда совпадающего с направлением ветра. В больших многоячейковых грозах существует закономерность, когда новая ячейка формируется справа по направлению несущего воздушного потока в северном полушарии и слева от направления несущего потока в южном полушарии.

Энергия грозовых облаков. Энергия, которая приводит в действие грозу, заключена в скрытой теплоте, высвобождающейся, когда водяной пар конденсируется и образует облачные капли. На каждый грамм конденсирующейся в атмосфере воды высвобождается приблизительно 600 калорий тепла. Когда водяные капли замерзают в верхней части облака, дополнительно высвобождается ещё около 80 калорий на грамм. Высвобождающаяся скрытая тепловая энергия частично преобразуется в кинетическую энергию восходящего потока. Грубая оценка общей энергии грозы может быть сделана на основе общего количества воды, выпавшей в виде осадков из облака. Типичной является энергия порядка 100 миллионов киловатт-часов, что, по приблизительной оценке, эквивалентно ядерному заряду в 20 килотонн (правда, эта энергия выделяется в гораздо большем объёме пространства и за гораздо большее время). Большие многоячейковые грозы могут обладать энергией в десятки и сотни раз большей.

1.2.6 Грозовые облака и воздушные суда

Грозовые облака и связанные с ними явления представляют собой наибольшую опасность для авиации. Кучево-дождевые облака представляют большую угрозу для авиации благодаря вероятности: сильной турбулентности, сильного обледенения, микровзрывов,

образованию шквалов или фронтов порывистости, создающих сильную турбулентность на низком уровне, высокой влажности - содержанию дождевой воды, града, грозových разрядов. Поскольку кучево-дождевая облачность может создавать много разных видов опасностей в одно и то же время в одном и том же месте, ее никогда не следует недооценивать. Воздушное судно должно избегать влетать в район развития кучево-дождевой облачности, особенно, если она может быть маскирована неясными облачными слоями.

Главная опасность заключается в сильной турбулентности внутри кучево-дождевых облаков и вблизи них. Интенсивные вертикальные токи часто сочетаются с резкими порывами ветра, обуславливающими штормовую болтанку самолетов, интенсивное обледенение, град, ливневые осадки, шквалы, смерчи, сдвиги ветра, все эти явления сопровождают грозу. Необходимым условием для грозовой деятельности является наличие влагонестойчивого состояния воздушных масс. Цикл жизни кучево-дождевого облака продолжается 1-6 часов

Воздействием разрядов молнии на воздушное судно (и на его экипаж и пассажиров) может быть множество. Если разряд попадает в прочную, металлически связанную конструкцию, самолет останется структурно прочным, и пассажиры и экипаж не будут непосредственно поражены током и напряжением разряда. Но вход и выход разряда будут явно видны как ожог на обшивке самолета. Это результат температуры 3000 - 32000° К внутри канала молнии. Если же разряд попадает рядом или проходит через такие детали, как антенны, тогда эти детали могут быть разрушены. Удар молнии вызовет у пассажиров и экипажа шок и, возможно, страх. Ночью разряд молнии может быть причиной временной слепоты или ухудшения зрения экипажа. Попадание молний в современные композитные материалы будут вызывать расслоение материала. Если разряды попадают в структурно важные зоны самолета, их целостность может подвергаться риску. Поэтому удары молнии по композитным лопастям вертолета особенно опасны. После удара молнии могут выйти из строя электрическая/электронная системы с отключением цепи питания. Магнитные компасы становятся ненадежными. Радиокommunikационному и навигационному оборудованию может быть нанесен ущерб. Автоматический радиокompас (ADF) будет указывать на центр бури. В настоящее

время нет строгой теории грозы как феномена атмосферного электричества, влияющего на эксплуатацию летательных аппаратов, поэтому проводятся только оценочные расчеты возможности возникновения разрядов молнии в цепочке «облако - воздушное судно - земля» при длине канала молнии до 10 км.

1.2.7 Электрические процессы в окружающем грозовое облако пространстве.

Разделение и нейтрализация электрических зарядов на стадии формирования кучевой облачности. В аспекте рассматриваемых проблем грозовых воздействий на летательные аппараты представляет интерес процессы разделения электрических зарядов на стадии формирования кучево-дождевой облачности. На рис. 1.13 представлены эти процессы в видении Юмана [1.2].

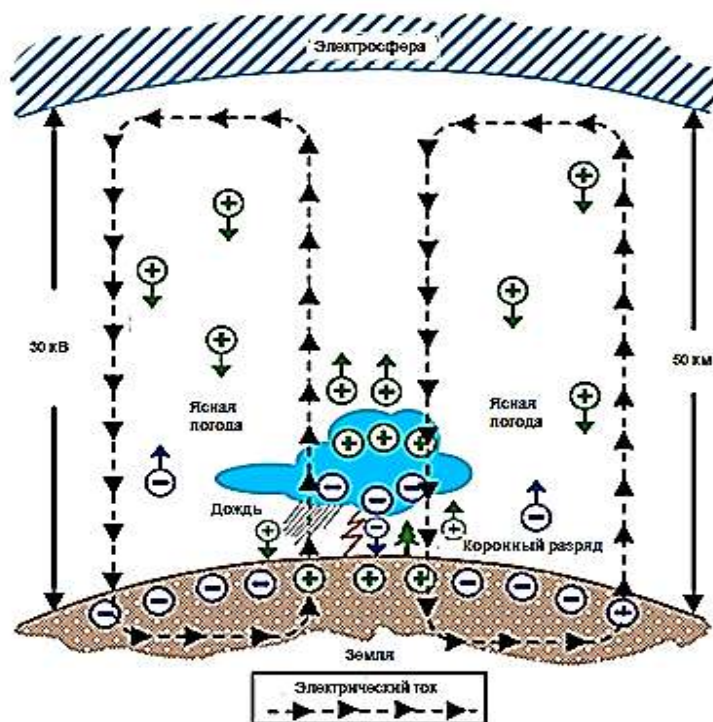


Рис. 1.13 - Разделение электрических зарядов на стадии формирования кучевой облачности [1.2].

В районах с хорошей погодой, окружающих область формирования кучевой облачности наблюдается движение вниз положительных, а вверх - отрицательных зарядов, при этом положительные заряды поднимаются от грозового облака в верхние слои атмосферы на высоту до 60 - 80 км.

Грозовые облака пополняют суммарный отрицательный заряд на Земле совместным действием вспышки молнии и приносят на Землю отрицательный заряд, а токи короны удаляют положительные заряд от Земли. Часть положительного заряда, генерируемого короной, захватывается дождем и возвращается на Землю. Положительный заряд в верхних слоях облака создает электрические поля, которые направляют положительные ионы к ионосфере. Отрицательные заряды, полученные Землей при грозе в области с хорошей погодой, нейтрализуются с одной стороны потоком положительных зарядов к Земле, а с другой - потоком отрицательных зарядов от Земли [1.1, 1.2].

Глобальная атмосферная электрическая цепь. Картина электрических процессов в области формирования грозы была бы не полной без рассмотрения понятия глобальной электрической цепи (ГЭЦ), описанной в [1.1-1.3], физическая модель построения которой приведена на рис. 1.14, а ее эквивалентная электрическая схема приведена на рис. 1.15.

Грозовой генератор тока является аналогом активных грозовых явлений, происходящих преимущественно в тропических сухопутных регионах. Эти грозы формируют токи смещения порядка 1250 А ориентированные к ионосфере. Обратным путем является глобальный ток хорошей погоды, протекающий между ионосферой и землей. сопротивление между ионосферой и землей составляет порядка 200 Ом, при этом емкость между ионосферой и землей составляет 0,7 Ф. Соответственно постоянная времени затухания (произведение $R \cdot C$) сферического конденсатора ионосфера-земля составляет всего около 2 минут. Это означает, что если глобальная грозовая активность прекратится, то электрическое поле в хорошую погоду будет уменьшаться до нуля с постоянного времени 2 минуты [1.2].

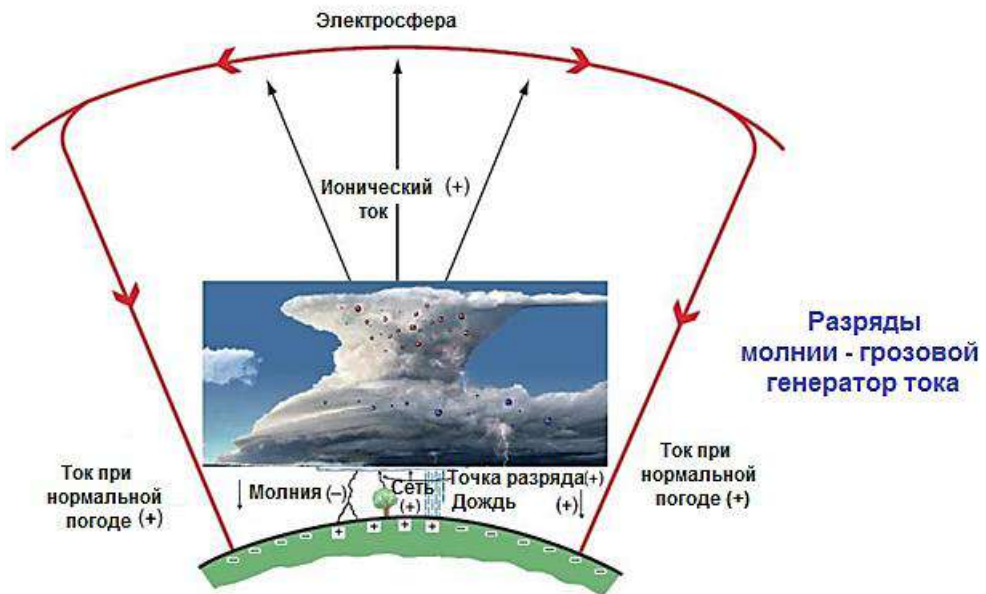


Рис. 1.14 – Принцип построение глобальной атмосферной электрической цепи

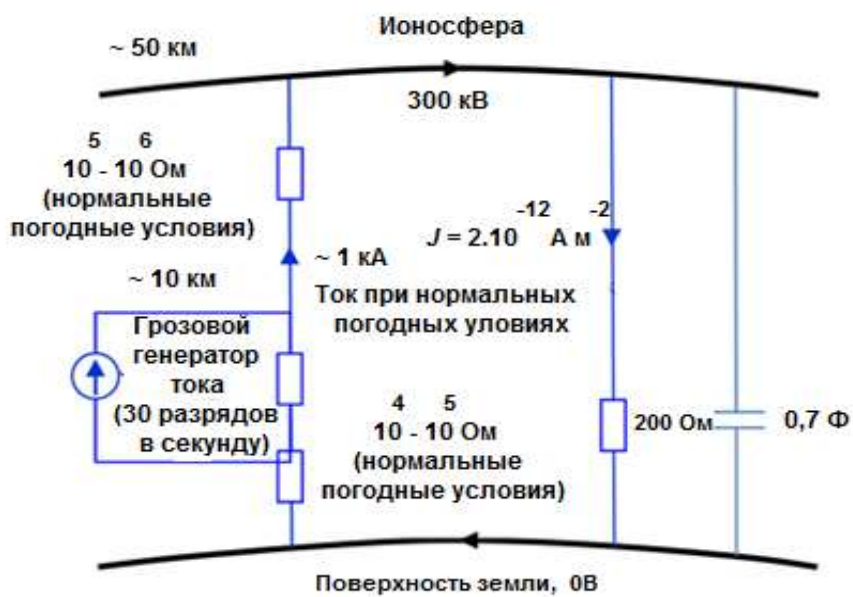


Рис. 1.15 - Эквивалентная схема глобальной атмосферной электрической цепи [1.2].

Физической причиной формирования ГЭЦ в атмосфере служит резкий рост проводимости воздуха с высотой [1.3]. Вблизи поверхности Земли проводимость воздуха очень мала и составляет порядка $(2-3) \cdot 10^{-14}$ См/м, что соответствует концентрации легких ионов около 10^3 см⁻³. С ростом высоты благодаря увеличению уровня ионизации, определяемого до 40 км галактическими космическими лучами, а выше - ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца, проводимость растет почти экспоненциально с характерным масштабом 6 км. Уже на высоте D-слоя ионосферы (около 80 км) она увеличивается более чем на 10 порядков по сравнению с тропосферой. Проводимость земли в поверхностном слое (и тем более воды в океане) тоже превышает проводимость пограничного слоя атмосферы на 10-12 порядков. Таким образом, постоянно функционирующие грозные генераторы оказываются сосредоточенными в достаточно узком слабо проводящем слое между земной поверхностью и ионосферой.

Часто при упрощенном описании ГЭЦ [1.3] земная поверхность и нижняя граница ионосферы (около 60-70 км) рассматриваются как обкладки гигантского сферического конденсатора, который разряжается в областях хорошей погоды и заряжается в областях грозной активности. При этом квазистационарные токи зарядки не замыкаются полностью на землю вблизи грозных облаков, а частично "затягиваются" в вышележащую область высокой проводимости и растекаются по ионосфере. Считается, что именно квазистационарные токи в первую очередь "несут ответственность" за поддержание разности потенциалов ~ 350 кВ между ионосферой и землей. Так как верхняя часть большинства грозных облаков имеет положительный заряд, потенциал ионосферы также оказывается положительным, и в областях хорошей погоды электрическое поле направлено вниз, обуславливая тем самым токи проводимости, замыкающие ГЭЦ. Если бы действие генераторов прекратилось, разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой исчезла бы за время около 8 мин. Наряду с грозными генераторами, потенциально важным источником атмосферного электричества может служить планетарный электрический генератор, обусловленный нетвердотельным характером вращения плазменной оболочки планеты.

С учетом последних экспериментальных данных и основанных на них теоретических оценок было создано новое описание глобальной атмосферной электрической цепи как открытой диссипативной системы, поддерживаемой в состоянии динамического равновесия поступающим в нее потоком энергии, в первую очередь энергии излучения Солнца. Установлено [1.3], что электрическая энергия генерируется преимущественно в областях пониженного атмосферного давления и в зонах холодных фронтов и составляет в среднем $5 \cdot 10^{13}$ Дж, что на два порядка выше энергии, сосредоточенной в глобальном сферическом конденсаторе земля-ионосфера. Средняя скорость диссипации электрической энергии $4 \cdot 10^{11}$ Вт превышает скорость рассеяния энергии в тектонических и магматических процессах и характеризует ГЭЦ как чрезвычайно динамичную систему с очень малым временем обновления электрической энергии.

Процесс трансформации энергии в атмосфере сопровождается генерацией диссипативных структур различных масштабов, в частности конвективных систем и аэроэлектрических структур, что наглядно можно представить в виде «пирамид» накопления электрической энергии и ее диссипации в атмосфере. Судя по всему, в ближайшее время, изучение энергетике, структуры и динамики глобальной электрической цепи будет оставаться одной из наиболее актуальных проблем атмосферного электричества.

Электрическая структура грозового облака. В атмосфере Земли всегда существует электрическое поле, которое создается отрицательным зарядом Земли и положительным зарядом облаков или атмосферы. Характеристикой этого поля в любой точке служит напряженность E или градиент потенциала, где dU/dn - производная от потенциала по нормали. У поверхности Земли эта величина в среднем имеет значение 150 В/м. Заряд облака связан с его поляризацией – концентрацией водяных паров восходящих потоков влажного воздуха на положительных и отрицательных ионах (центрах конденсации) и разделением заряженных капелек влаги.

Основными ионизаторами тропосферы являются радиоактивные элементы, находящиеся в составе Земли и атмосфере, а также космическое излучение.

Вследствие малой проникающей способности радиоактивного излучения в атмосфере ионизирующее действие на нее

радиоактивных элементов Земли невелико. Для слоя до 2—3 км от земной поверхности существенное ионизирующее воздействие оказывают частички радиоактивных веществ, находящихся в атмосфере во взвешенном состоянии. Так, в слое 0—0,5 км на 75% ионизация атмосферы обязана этим ионизаторам, а в слое 0,5—1,0 км доля их воздействия составляет 35% - 65% и здесь ионизация осуществляется уже за счет воздействия космических лучей. Таким образом, начиная с высот 4-5 км, ионизация атмосферы полностью обязана космическому излучению.

Первичными космическими частицами, проникающими из мирового пространства, являются протоны. В атмосфере, взаимодействуя с атомами газов, они образуют поток разнообразных частиц (электроны, протоны, фотоны, мезоны и т. д.).

Электрическое поле атмосферы определяется *плотностью тока* (количеством ионов, проходящих в 1 сек. через единицу площади) и ее проводимостью.

Проводимость есть сумма произведений количества полярных ионов на их заряды и подвижность. Последняя представляет собой скорость движения ионов под действием электрической силы в поле с напряженностью, равной единице. Скорость ионов в среднем составляет величину 1-2 см/с и она зависит от природы ионизируемого газа.

Поскольку ионы, находящиеся в тропосфере, имеют различные размеры, то и их подвижность различна. Легкие ионы имеют подвижность $1 \text{ см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$, а ультратяжелые $25 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$. Плотность тока проводимости i выражается формулой $i = E \cdot \gamma$, где γ - проводимость.

Из-за малой подвижности тяжелых ионов их участие в создании проводимости атмосферы и вертикальных токов мало. Увеличение количества тяжелых ионов понижает проводимость атмосферы и тем самым повышает напряженность электрического поля в ней. При туманах и большой запыленности воздуха из-за прилипания легких ионов к частицам воды и пыли проводимость понижается, а напряженность поля повышается, т. е. между проводимостью и напряженностью поля имеется обратная зависимость.

Электрическое поле атмосферы зависит от множества факторов (облаков, осадков, грозовой деятельности, условий местности и т. п.) и поэтому очень изменчиво. Градиент потенциала может меняться

от нескольких десятков до сотен тысяч вольт на метр. В средних широтах он несколько больше и убывает по направлению к полюсу и экватору, а также по мере поднятия вверх.

Напряженность электрического поля (350 В/м) имеет довольно хорошо выраженный годовой и суточный ход. В средних широтах северного полушария максимум наблюдается зимой, минимум—летом; к северу и югу амплитуда годового хода уменьшается. В тропической зоне часто можно наблюдать два максимума и два минимума.

Суточный ход в сильной степени зависит от электрических свойств подстилающей поверхности в данном месте и поэтому имеет большие отличия даже в близко расположенных пунктах. Кроме того, он меняется от сезона к сезону.

Наиболее правильный суточный ход напряженности поля наблюдается над океанами, где он почти неизменен в течение всего года. Здесь максимум наблюдается в 18-19 ч, а минимум в 3 ч по Гринвичу (*унитарная вариация*). Почти такую же картину суточный ход имеет в полярных областях и на некоторой высоте над земной поверхностью.

Механизм электризации облаков. Для объяснения формирования электрической структуры грозового облака предлагалось много теорий, и до сих пор эта область науки является областью активных исследований. Основная гипотеза основана на том, что если более крупные и тяжелые облачные частицы заряжаются преимущественно отрицательно, а более легкие мелкие частицы несут положительный заряд, то пространственное разделение объемных зарядов возникает за счет того, что крупные частицы падают с большей скоростью, чем мелкие облачные компоненты. Этот механизм, в целом, согласуется с лабораторными экспериментами, которые показывают сильную передачу заряда при взаимодействии частиц ледяной крупы (*крупна* — пористые частицы из замерзших водяных капелек) или *града* с ледяными кристаллами в присутствии переохлажденных водяных капель. Знак и величина передаваемого при контактах заряда зависят от температуры окружающего воздуха и влажности облака, но также и от размеров ледяных кристаллов, скорости столкновения и других факторов. Возможно также действие и других механизмов электризации. Многочисленные наблюдения показывают, что осадки всех видов

несут электрические заряды; при этом более крупные капли несут и больший заряд. Общая сумма положительных зарядов в осадках оказывается больше суммы отрицательных. Знак заряда зависит от той части облака, в которой образовалась капля; в то же время этот знак может изменяться при падении капли. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,7 раза больше числа отрицательно заряженных капель. Средний отрицательный заряд, приходящийся на каплю, больше, чем положительный. Полной теории образования зарядов капель еще нет. Однако можно указать на ряд таких процессов, которые приводят к электризации капель и их перезарядке. Назовем некоторые из этих процессов. Находящиеся в электрическом поле атмосферы капли поляризованы т. е. в верхней их части один знак заряда, а в нижней другой, равный ему по величине (рис. 1.16 б).

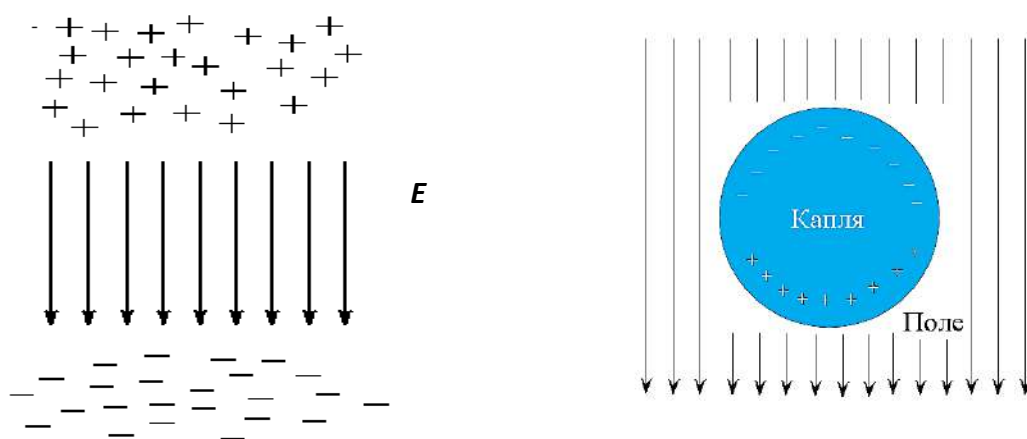


Рис. 1.16 – Поляризация капли в электрическом поле атмосферы
 а – электрическое поле атмосферы
 б – капля в электрическом поле атмосферы

В физике известно так называемое *баллоэлектрическое явление*, которое заключается в том, что при разбрызгивании капли электризуются, причем крупные брызги получают положительный заряд, а мелкие — отрицательный.

Также, важное значение имеют процессы, связанные с фазовыми превращениями воды. При замерзании слабых растворов ряда солей

между каплями и частичками замерзшей воды появляется разность потенциалов.

Знак заряда льда зависит от типа соли и ее концентрации. Например, при малых концентрациях хлоридов лед заряжается отрицательно, а солей аммония и карбонатов — положительно. Наблюдения показывают, что при замерзании градин замерзшая часть электризуется отрицательно.

Заряды облаков. Электрические заряды элементов облака сильно искажают «нормальное» электрическое поле атмосферы. Резкие изменения этих объемных зарядов (особенно в грозовых облаках) сказываются на изменении электрического поля у земной поверхности. В разных частях облака объемные заряды обычно имеют разные знаки (рис. 1.17).

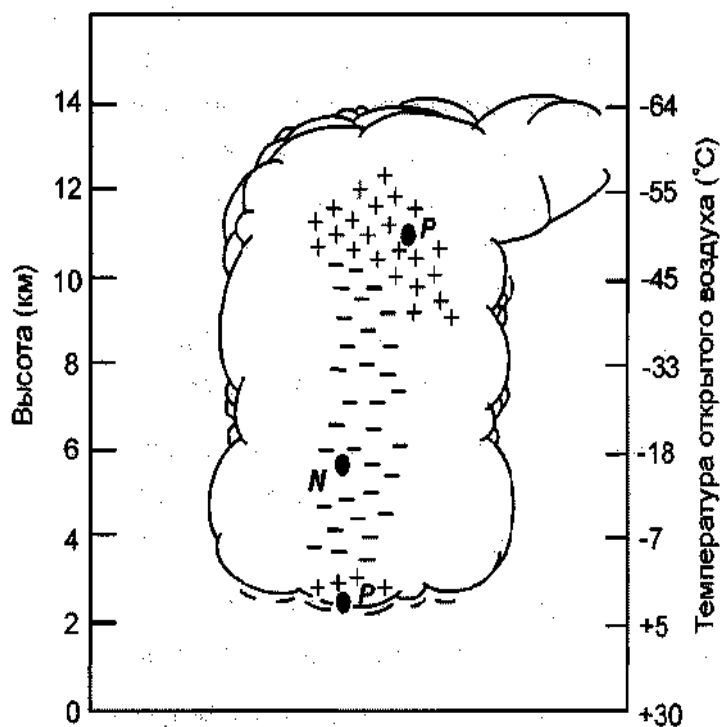


Рис. 1.17– Распределение электрических зарядов в облаке [1.12].

В верхней части грозового облака выше изотермы -10° , (где влага в виде ледяных кристаллов) происходит электризация мелких ледяных кристаллов, они приобретают положительный заряд. Более крупные кристаллы опускаются вниз, приобретая в средней части

облака отрицательный заряд; при температуре выше 0° в нижней части облака они тают, под влиянием восходящих токов могут разрушаться и приобретать положительный заряд. Распределение и движение электрических зарядов внутри и вокруг грозового облака является сложным непрерывно меняющимся процессом. Тем не менее, можно представить обобщенную картину распределения электрических зарядов на стадии зрелости облака. Доминирует положительная дипольная структура, в которой положительный заряд находится в верхней части облака, а отрицательный заряд находится под ним внутри облака. В основании облака и под ним наблюдается нижний положительный заряд. Атмосферные ионы, двигаясь под действием электрического поля, формируют на границах облака экранирующие слои, маскирующие электрическую структуру облака от внешнего наблюдателя. Измерения показывают, что в различных географических условиях основной отрицательный заряд грозового облака расположен на высотах с температурой окружающего воздуха от -5 до -17°C . Чем больше скорость восходящего потока в облаке, тем на большей высоте находится центр отрицательного заряда. Плотность объемного заряда лежит в диапазоне $1-10$ Кл/км³.

Существует заметная доля гроз с инверсной структурой зарядов: — отрицательным зарядом в верхней части облака и положительным зарядом во внутренней части облака, а также со сложной структурой с четырьмя и более зонами объемных зарядов разной полярности.

Когда величина накопившегося в облаке объемного электрического заряда становится достаточно большой, между областями заряженными противоположным знаком происходит молниевый разряд. Разряд может произойти также между облаком и Землей, облаком и нейтральной атмосферой, облаком и ионосферой. В типичной грозе от двух третей до 100 процентов разрядов приходится на внутриоблачные разряды, межоблачные разряды или разряды облако — воздух. Оставшаяся часть — это разряды облако-земля (рис. 1.18).

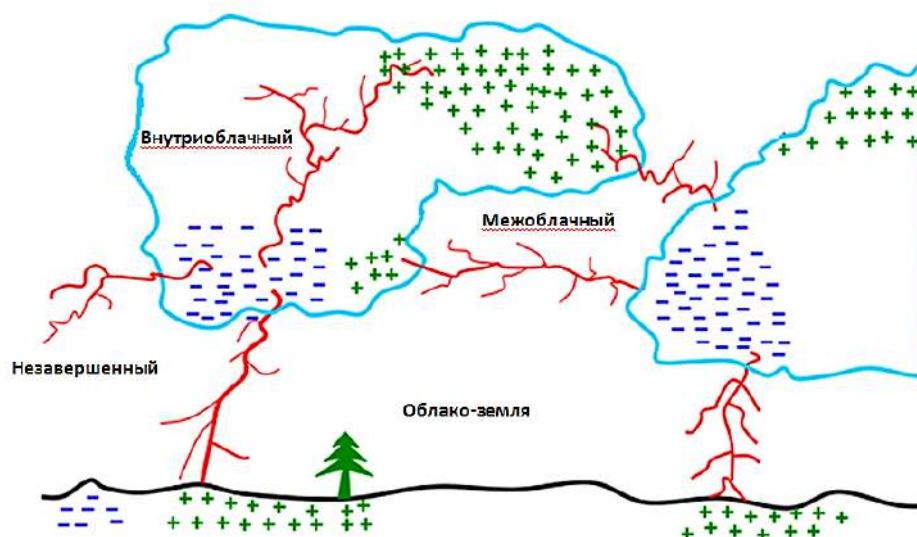


Рис. 1.18 – Разновидности разрядов молний, формируемых кучево-дождевой грозовой облачностью

В последние годы стало понятно, что молния может быть искусственно инициирована в облаке, которое в обычных условиях не переходит в грозовую стадию. В облаках, имеющих зоны электризации и создающих электрические поля, молнии могут быть инициированы горами, высотными сооружениями, самолетами или объектами ракетно-космической техники, оказавшимися в зоне сильных электрических полей.

Прежде всего, молнии являются причиной пожаров и гибели людей. Так в Украине в среднем от ударов молнии ежегодно гибнет 15-17 человек. В Европе этот показатель составляет около 40 человек, а в Америке 200-230 человек. В мире ежегодно от ударов молнии погибает около 3000 человек.

1.3 Молниевые электрические разряды не грозового происхождения

Помимо разрядов молний грозового происхождения, разряды, аналогичные молниевым также возникают при пылевых, песчаных и снежных бурях, торнадо, в облаках вулканического пепла, а также при ядерных взрывах. О разделении зарядов при этом явлении ученые говорят уже многие годы. Больше всего специалистов интересует вопрос, как изначально нейтральные частицы-

диэлектрики получают мощный заряд. Остается загадкой, как изначально нейтральные частицы-диэлектрики, в отсутствие влаги и, контактируя всего лишь с такими же частицами, могут создавать столь сильные поля, что возникают искры и молнии. На сегодняшний день наиболее корректными можно считать три модели электризации [1.13, 1.14].

Электростатические заряды возникают на диэлектрических телах за счет электризации, причиной которой может быть электростатическая индукция, механические процессы (трение) и ионизация от внешних источников.

На рис. 1.19 представлен принцип *электризации путем индукции*. Электрически нейтральное тело попадает в электростатическое поле, образованное, например, заряженными телами *A* и *C*. При этом, в теле *B* происходит поляризация зарядов. Если затем отвести, например, отрицательные заряды тела *B* на тело *C* через проводящее соединение *V* (контакт или искру), то тело *B* останется заряженным положительно даже в том случае, если внешнее поле исчезнет.

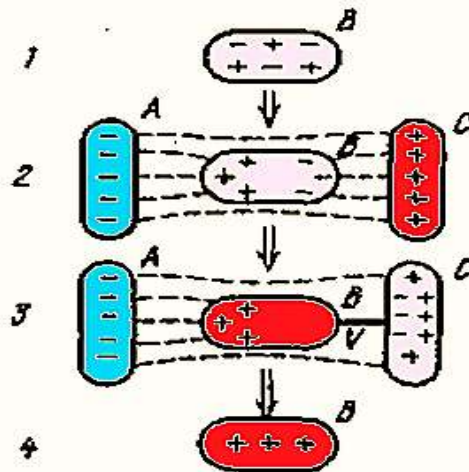


Рис. 1.19 – Принцип электризации за счет индукции:

- 1 - тело *B* электрически нейтрально;
- 2 - поляризация тела *B* в электрическом состоянии;
- 3 - отвод отрицательных зарядов *C*;
- 4 - тело *B* заряжено положительно.

Наиболее часто встречающаяся форма возникновения паразитных электростатических зарядов - *электризация трением*. Она возникает, если два различные, первоначально нейтральные тела (или две субстанции) *A* и *B* (рис. 1.20) соприкасаются, трутся друг о друга, а затем разъединяются. Одно тело передает электроны

другому и заряжается положительно, а тело, получившее электроны, - отрицательно. Полярность и значение зарядов зависят, с одной стороны, от таких свойств материалов тел, как структуры материала и поверхности, значения их диэлектрической проницаемости, объемной и поверхностной электрической проводимости, а, с другой стороны, от ряда внешних факторов, например, от размера контактной поверхности, интенсивности трения, силы сжатия тел перед разделением, скорости разведения, температуры, влажности воздуха, причем последняя имеет очень большое влияние.

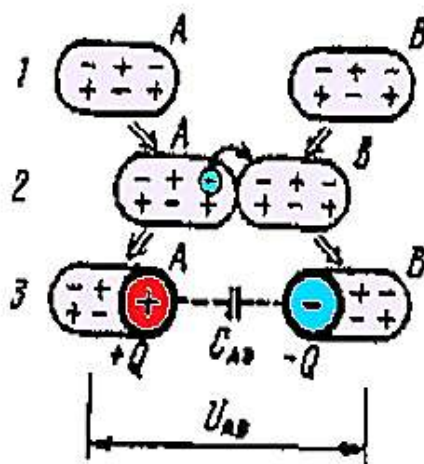


Рис. 1.20 – Принцип электризации трением:

- 1 - две субстанции А и В в нейтральном поле;
- 2- фаза касания или трения;
- 3 - А заряжено положительно, В - при искровом разряде или касании тела отрицательно.

Электризация может также происходить при **ионизации** окружающей среды от внешних мощных источников, таких, например, как наземные ядерные взрывы. В этом случае за счет гамма-излучения возникают быстрые комптоновские электроны, воздействие которых на мелкодисперсные компоненты пылевого облако и окружающий воздух вызывают их ионизацию и разделение зарядов (рис. 1.21).

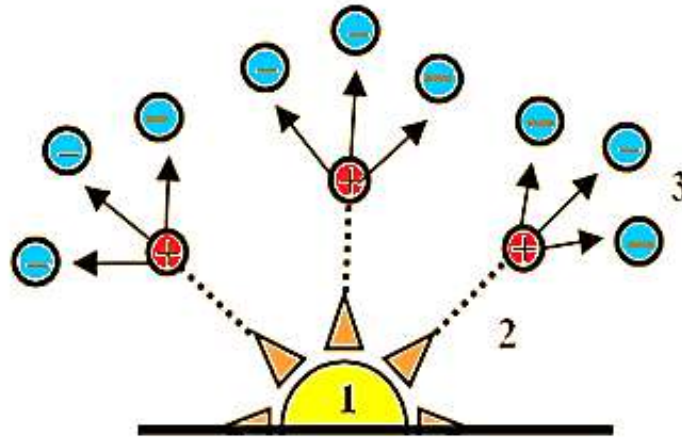


Рис. 1.21 – Принцип электризации внешней ионизацией
 1 – наземный ядерный взрыв;
 2 – гамма-излучение;
 3 – комптоновские электроны.

В основном, разряды молний при ядерных и термоядерных взрывах были зафиксированы при наземном и приземном видах подрыва этих зарядов [1.15].

1.4 Классификация грозовых разрядов

Для возникновения молнии необходимо, чтобы в относительно малом (но не меньше некоторого критического) объёме облака образовалось электрическое поле с напряжённостью, достаточной для начала электрического разряда (~ 1 МВ/м), а в значительной части облака существовало бы поле со средней напряжённостью, достаточной для поддержания начавшегося разряда ($\sim 0,1-0,2$ МВ/м).

Так как в грозовом облаке в процессе его электризации возникают электрические поля, напряженность которого достигает нескольких сотен киловольт на метр между отдельными его частями, а также между облаком и Землей. В результате чего возникают искровые разряды в виде молний различных видов.

Молнии имеют самые различные разновидности. В основу классификации молний положены принципы их места формирования и пространственного расположения, внешнего вида,

статистических характеристик частоты возникновения и линейных параметров. При этом их класс постоянно пополняется.

На сегодняшний день, согласно принятой классификации (см. табл. 1.1) это:

- *Огни святого Эльма;*
- *Линейная молния;*
- *Ленточная молния;*
- *Четочная молния;*
- *Шторовая молния;*
- *Горизонтальная молния;*
- *Шаровая молния;*
- *Сверхмолнии (спрайты, синие джеты и эльфы);*
- *Молниевые электрические разряды негрозового происхождения.*

Таблица 1.1 Основные виды грозовых разрядов⁶

Огни святого Эльма



Свечение голубого или красного цвета, которое возникает в предгрозовой или грозовой период на острых краях объектов, представляющее собой тихий или коронный разряд. Как правило, огни святого Эльма означают приближение грозы или метели.

⁶ Фото с сайтов: <http://img.bibo.kz/6408/6408327.JPG>;
http://animalworld.com.ua/news/Kakie_byvajut_vidy_molnij;
<https://s.zefirka.net/images/2015-06-29/osnovnye-vidy-molnij/osnovnye-vidy-molnij-7.jpg>

Линейные молнии



Линейная молния «облако-земля» отрицательной полярности (нисходящая)

Самый распространенный тип грозовых разрядов. В результате скачкообразного преобразования обычного воздуха в плазму происходит серия разрядов по изломанному ионному каналу в атмосфере от облака к земле.



Линейная молния «облако-земля» положительной полярности (нисходящая)

Редкий вид грозового разряда. Разряд длится в десять раз дольше обычной отрицательной наземной молнии, десятикратно мощнее ее и может ударить в землю на расстоянии десятков и сотен километров от облака, часто при абсолютно ясной погоде.

Линейная молния «земля - облако» (восходящая)



Образуется вследствие накопления объемного электрического заряда на вершине высоких объектов, расположенных на земле, что делает их весьма избирательными объектами для разряда молнии. Такие молнии образуются в результате пробоя воздушного промежутка между вершиной заряженного объекта и нижней частью грозового облака.

Ленточная молния

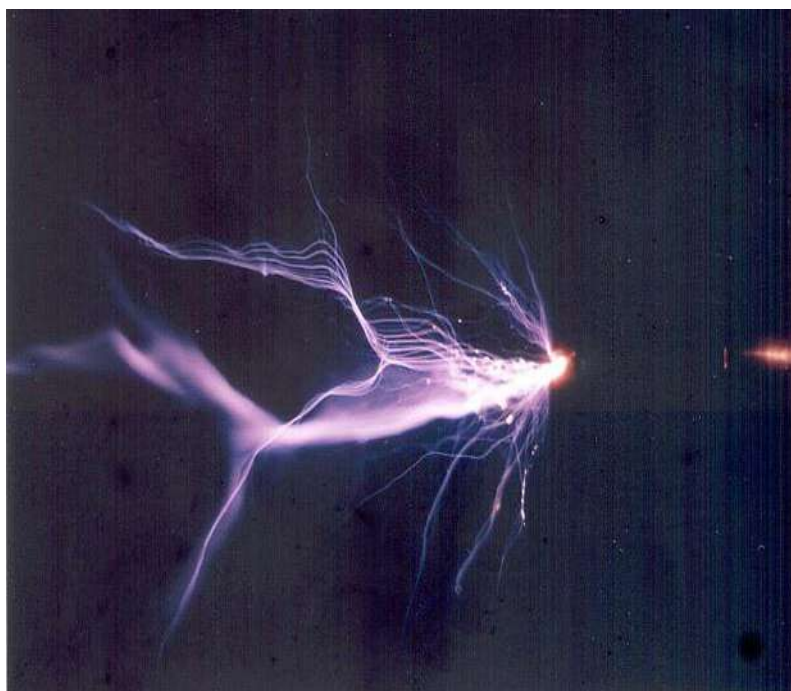


Серия зигзагообразных линейных разрядов от облаков к земле, возникающих при сильном боковом ветре, которые происходят по одному и тому же каналу и параллельно смещены друг относительно друга с относительно небольшими промежутками или без них. Между разрядами ветер чуть-чуть сносит канал, и наш глаз видит светящуюся полосу из молний.



Шторовая молния

Одновременные разряды молний, образующие широкую вертикальную полосу света, которые сопровождаются низким негромким гулом.



Объёмная молния

Белая или красноватая вспышка, возникающая при полупрозрачной низкой облачности, с сильным звуковым эффектом в виде треска “отовсюду”. Чаще всего наблюдается перед основной фазой грозы.



Молния "облако -облако"

Поскольку верхняя часть грозового облака несет положительный заряд, а нижняя отрицательный, близко расположенные грозовые облака могут формировать молниевые электрические разряды между разнополярными областями соседних облаков



Облачная молния

Разряды, происходящие в облаках между центрами скопления разнополярных зарядов в горизонтальном и (или) вертикальном направлениях. Могут быть также ориентированы от облака в верхние слои атмосферы.



Горизонтальная молния

Разряд молнии не «бьет» в землю, а распространяется по небу горизонтально исходя от одной грозовой тучи к другой. Иногда такая молния возникает в чистом небе, «гром среди ясного неба». Такие молнии очень мощные и очень опасные



Необычные молнии

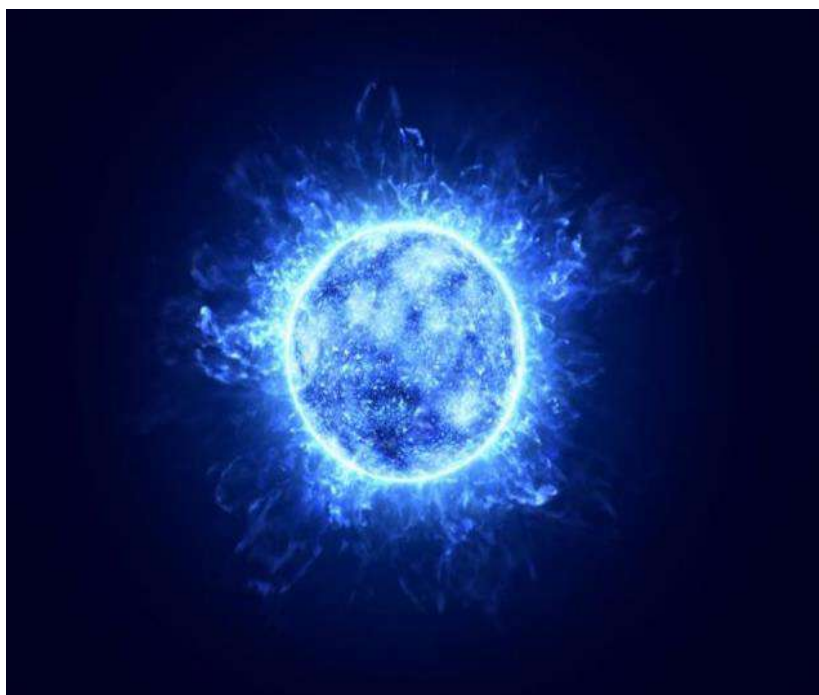
Этот вид молний имеют форму либо огромной змеи, которая частично свернулась в клубок над землей, либо извивается вблизи ее поверхности.

Четочная молния



Канал разряда молнии характеризуется яркими утолщениями, которые светятся дольше обычного, и возникают вследствие радиальной неустойчивости канала плазменного типа с «перетяжками», при так называемом «пинч-эффекте», связанным с высокой плотностью тока протекающего по каналу разряда, и различным остыванием отдельных участков канала разряда

Шаровая молния



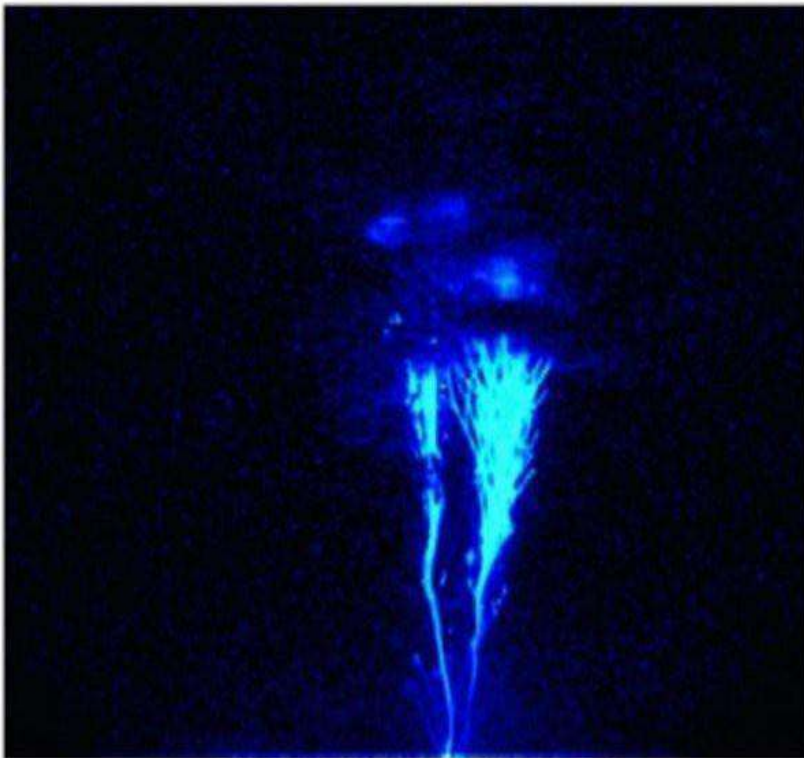
Плазменный объект в виде светящегося шара от нескольких сантиметров до нескольких метров в диаметре, медленно плывущий в воздухе. Время жизни — до нескольких минут. Природа этого явления, которое представляет очень серьезную опасность для жизни до сих пор неясна.

Сверхмолнии



Спрайт

Стратосферный разряд, открытый в 1989 году. Возникает на высоте от 50 до 150 км над грозовыми облаками как побочный эффект разряда линейной положительной молнии имеет вид кольца, оснащенного 10 - 20 км «свечами».



Синий джет

Редкий атмосферный разряд, идущий от грозового облака вверх на десятки километров. Представляют собой трубки-конусы синего цвета. Высота джетов может достигать 40-70 км (нижняя граница ионосферы), живут джеты относительно дольше эльфов. Открыты в 1989 году при наблюдениях с космического корабля Шаттл.

Продолжение табл. 1.1



Эльф

Очень короткая красная вспышка на высоте около 100 км. По ширине может достигать размера до 400 км. Возникает в результате возбуждения атомов азота магнитным импульсом от разрядов молний внизу в облаках.

Молниевые электрические разряды негрозового происхождения



Вулканические молнии

Представляют собой разряды, аналогичные разрядом линейной молнии, наблюдаемые либо непосредственно к жерлу вулкана, либо в облаке пепла на значительной высоте от места извержения

Продолжение табл. 1.1



Ветвистые молнии пыльных бурь

Представляют собой разряды, аналогичные разрядом линейной молнии, наблюдаемые в засушливых районах и пустынях при пыльных бурях. Возникают вследствие электризации трением частиц пыли или песка.



Гладкие молнии торнадо

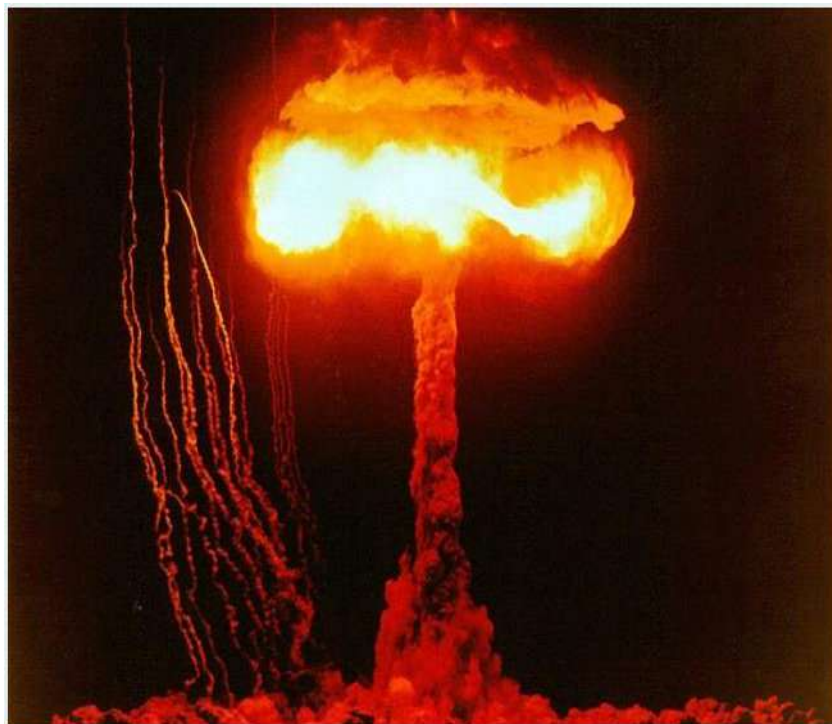
Молнии, которые разряжаются в месте формирования или в непосредственной близости от смерча. Выглядят очень гладкими, лишёнными разветвлений и напоминают молнии, распространяющиеся по уже давно сформированному каналу разряда

Окончание табл. 1.1



Снеговая молния

Довольно редкое метеорологическое явление, когда вместо ливневого дождя выпадает ливневый снег, ледяной дождь или ледяная крупа, которые и являются причиной молний



Молнии от наземных (приземных) ядерных и термоядерных взрывов

Представляют собой разряды, аналогичные разрядом линейной молнии, возникающих между верхней частью «гриба» ядерного (термоядерного) взрыва и землей. Причина возникновения – резкая ионизация области взрыва.

На рис. 1.22 приведена пространственная диаграмма распределения грозовых разрядов по высоте, соответствующая современным представлениям.

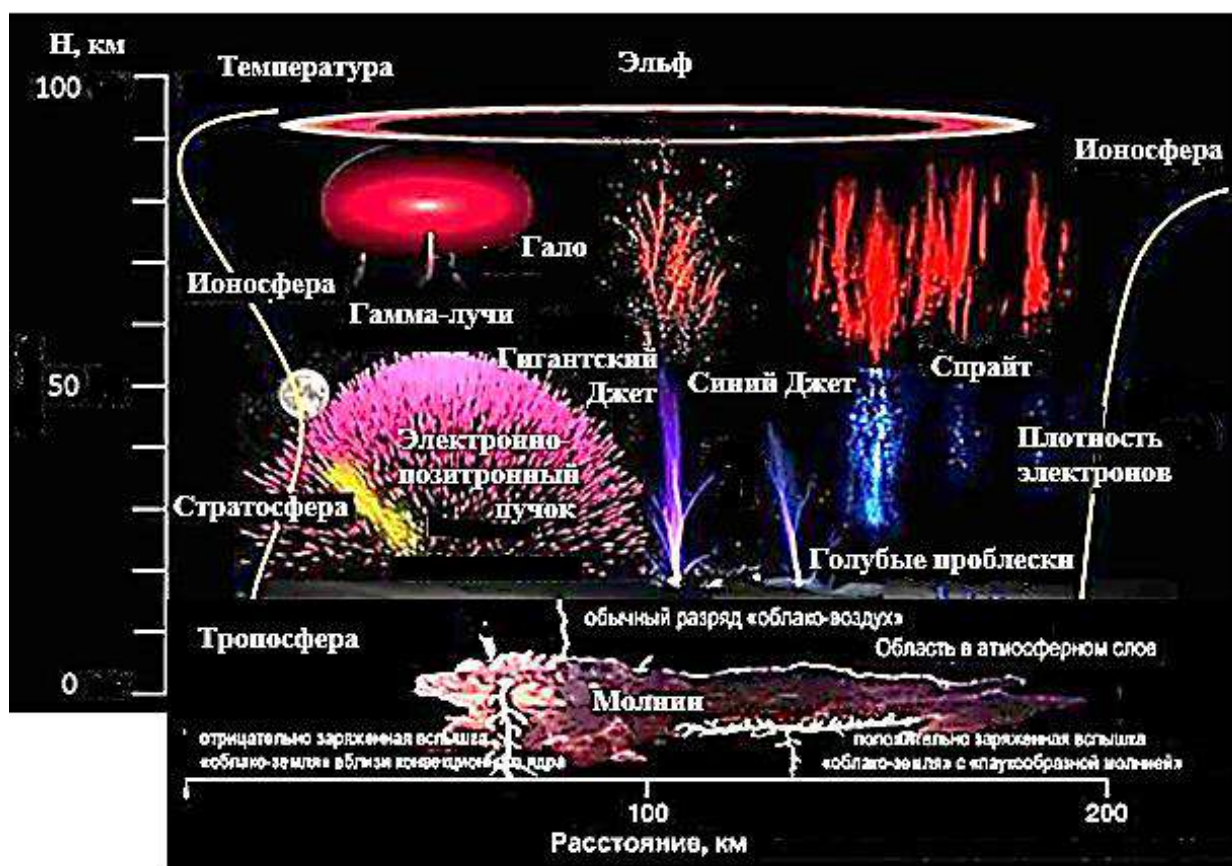


Рис. 1.22 - Пространственная диаграмма распределения грозовых разрядов по высоте над поверхностью земли

Как следует из приведенной диаграммы наиболее большой класс молний, объединенных по признаку их места расположения составляют грозовые разряды линейных молний, куда относятся:

- наземные разряды облако-земля положительной и отрицательной полярности;
- облачные разряды, и относящиеся к ним внутриоблачные разряды, аномальные разряды облако-облако, незавершенные грозовые разряды облако-верхние слои атмосферы.

Особый класс грозовых разрядов занимают открытые в последнее время разряды сверхмолний, к которым относятся красные призраки (спрайты), голубые струи (джеты) и эльфы

Отдельное место занимают молниевые электрические разряды негрозового происхождения.

1.4.1 Огни святого Эльма

Интересное природное явление, при котором на вершинах острых предметов возникает красновато-голубоватое свечение. Для его появления необходимы соответствующие условия. Так, когда напряженность электрического поля в атмосфере достигает значений 500 В/м и выше, что бывает перед грозой (или в грозу) на остриях, острых углах и кромках предметов, возвышающихся над земной поверхностью, наблюдаются светящиеся разряды [1.10]. Такое явление получило название *огней святого Эльма*.

Это явление чаще всего наблюдается на острых скалах, на выступающих вверх концах башен, на мачтах кораблей и изредка на животных и человеке. Оно может продолжаться несколько часов. Сильное свечение можно иногда наблюдать во время песчаных бурь, когда поднятые в воздух песчинки сильно электризуются за счет трения друг о друга. Так, во время извержения вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника, поднимавшаяся в огромном количестве вулканическая пыль вызвала появление огней святого Эльма, а затем разрядов молний над вершиной горы.

Обычно эти разряды сопровождаются характерным шипением и потрескиванием. В горах это явление преобладает в летнее время, хотя может наблюдаться и в другие сезоны; в низинах же оно бывает зимой во время снежных бурь.

Также подобные разряды можно наблюдать на самолетах и вертолетах, летящих через заряженные облака, в процессе их эксплуатации в предгрозовой и грозовой обстановке. Источниками яркого свечения становятся винты и заостренные части корпуса. Это свечение также может возникать на обшивке самолета, попавшего в облако вулканического пепла.

Такое свое романтическое название — это явление получило благодаря тому, что впервые было описано монахами церкви святого Эльма в Италии, где оно наблюдалось довольно часто в силу высокогорного места расположения церкви.

С физической точки зрения огни святого Эльма относятся к так называемому виду тихого или коронного разряда. Над острыми предметами линии равного электрического потенциала сгущаются, в результате чего в этом месте существенно повышается величина напряженности электрического поля, значение которой может достигать до 30 кВ/см и выше [1.16]. При этом, электроны,

образовавшиеся около острия в результате ионизации в зоне резкой неоднородности электрического поля, разгоняются до скоростей лавинообразного увеличения, вызывая вторичную ударную ионизацию, которая сопровождается свечением.

Форма такого свечения имеет вид короны. В зависимости от заряда электрода (острия) размеры короны различны: при положительном заряде они больше и цвет свечения красно-фиолетовый, при отрицательном — меньше и корона светится голубоватым цветом. Как правило, огни святого Эльма означают приближение грозы метели или пыльной бури. Увидеть огни святого Эльма можно не только на строениях, мачтах кораблей, самолетах, вертолетах, электрических опорах, животных, людях, но и на верхушках одиноких деревьев и кустах. На рис. 1.23 приведены фотографии, иллюстрирующие появление огней святого Эльма в предгрозовом период на различных ранее перечисленных объектах, имеющих острые кромки⁷.

1.4.2. Линейная молния

Обычно в природе наиболее часто наблюдаются линейные молнии, которые относятся к так называемым безэлектродным разрядам, которые начинаются (и заканчиваются) в скоплениях заряженных частиц (объемных зарядов) грозовых облаков. Это определяет их некоторые, до сих пор не объяснённые свойства, отличающие молнии от разрядов между электродами.

Так, молнии не бывают короче нескольких сотен метров; они возникают в электрических полях значительно более слабых, чем поля при межэлектродных разрядах; сбор зарядов, переносимых молнией, происходит за тысячные доли секунды с мириадом мелких, хорошо изолированных друг от друга частиц, расположенных в объёме нескольких км³.

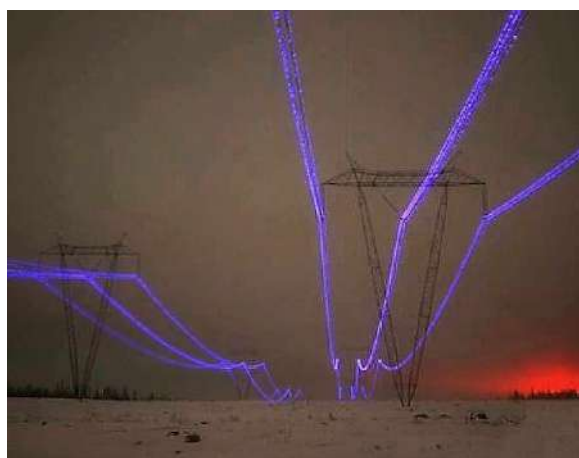
⁷ Фото с сайта ru.wikipedia.org > wiki



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.23 – Фотографии огней святого Эльма в предгрозовую период на острых краях типичных объектов их возникновения
а – на городских зданиях; б – на мачтах кораблей;
в – на линиях электропередачи; г – на фюзеляже самолета;
д – на листьях растений.

В природе существуют различные виды линейных молний. Наиболее хорошо изучен процесс формирования и развития молний в грозовых облаках и околоземном пространстве. При этом эти молнии могут ударять как в землю (такие молнии принято называть наземными), так и развиваться в самих облаках (эти молнии относятся к типу облачных) и между облаками (межоблачные разряды), также распространяющиеся в горизонтальной плоскости по небу (горизонтальные молнии) (см. рис. 1.18).

Именно линейные молнии являются наиболее опасными для летательных аппаратов, находящихся как на земле, так и в воздушном пространстве. Наиболее часто летательные аппараты подвергаются поражениям внутриоблачных, межоблачных и незавершенных линейных разрядов и горизонтальных молний.

В табл. 1.2 [1.9] приведены основные виды линейных молний и приведены их характерные особенности.

Средняя длина линейных молний между облаком и Землей в зависимости от района составляет 1,5—3 км, внутри и между облаками от 15 км до 20 км, а протяженность горизонтальных молний достигает сотен километров. Диаметр канала линейных молний в среднем составляет 16—20 см, иногда он достигает 40-60 см, сила тока — сотен тысяч ампер, длительность молнии не более 1,5 сек, импульсная мощность составляет миллионы киловатт.

Наземные молнии формируются в тех случаях, когда образуются грозовые кучево-дождевые облака, нижняя кромка которых располагается над поверхностью земли на высоте не более 1,5-2 км.

При разряде нисходящая отрицательная молния сначала движется зигзагообразно, а затем по мере достижения расстояния ориентирования на наземный объект совершает последний скачок, как правило прямолинейный. Молния, с одной стороны, стремится к более возвышенным точкам земной поверхности, а с другой, к тем местам, где земная кора обладает большей электропроводностью. Поэтому не обязательно молния попадает только в возвышенные точки; она может ударить и в низины.

Таблица 1.2 - Виды разрядов линейных молний и их характерные особенности [1.9].

Вид грозового разряда		Характерные особенности
Облако -земля (наземный)	Отрицательный	Формируется на области отрицательного объемного заряда основания грозового облака. Составляет 85-95 % всех разрядов молнии облако-земля. По одному и тому же каналу, как правило, происходит несколько разрядов молнии, импульсы тока большой амплитуды чередуются с постоянными токами малой амплитуды. В процессе формирования и развития грозовой разряд проходит три стадии: лидерную, главную и послесвечения.
	Положительный	Возникает в 5-15% случаев, как правило, в конце грозы и в основном ориентирован в высокие объекты. Несет к земле положительный заряд, в среднем в 3 раза, превышающий заряд отрицательной молнии, и характеризуется наличием только одного разряда по каналу. Импульсы тока положительной молнии имеют в 1,5-2 раза большую амплитуду и превышают в 5 раз длительность времени нарастания и 7-8 раз время спада тока по сравнению с импульсами тока молнии отрицательной полярности
Облачный	Внутриоблачный	На данный вид разрядов приходится порядка 50% всех грозовых разрядов. Разряд в пространстве распространяется относительно медленно, без скачков и ступеней, и завершается относительно слабым возвратным ударом. Развитие разряда происходит одновременно от областей с разной полярностью зарядов. Длительность разряда равна общей длительности разряда облако-земля при котором нейтрализуется суммарный заряд той же величины, что и при разряде облако-земля, и является скорее горизонтальным, чем вертикальным.
	Облако-облако (аномальный)	Малоизученный вид протяженных грозовых разрядов. Имеет длину до 40-50 км, распространяясь поочередно от одного объемного грозового облака к другому. По своим характеристикам слабее внутриоблачных разрядов.
	Облако-верхние слои атмосферы (незавершенный)	Довольно редкий вид разряда ввиду экранирующего действия скопления зарядов в пределах грозового облака. Главная стадия отсутствует, разряд начинается и заканчивается его лидерной стадией.
	Горизонтальный	Разряд молнии не бьет в землю, а распространяется в горизонтальной плоскости по небу. Иногда такая молния может распространяться по чистому небу, исходя от одной грозовой тучи. Такие молнии очень мощные и очень опасные.

Наземные молнии бывают отрицательной и положительной полярности. По внешнему виду отрицательные молнии отличаются от положительной более ветвистой структурой. Отдельный класс наземных молний составляет ленточные молнии

Наземные молнии наиболее опасные для летательных аппаратов на этапах взлета и посадки, при их нахождении в областях между грозовым облаком и землей.

На рис. 1.24 – 1.26 приведены фотографии типичных наземных линейных молний различных видов.



Рис. 1.24 – Фотографии типичных наземных линейных молний отрицательной полярности



Рис. 1.25 – Фотографии типичных наземных линейных молний положительной полярности

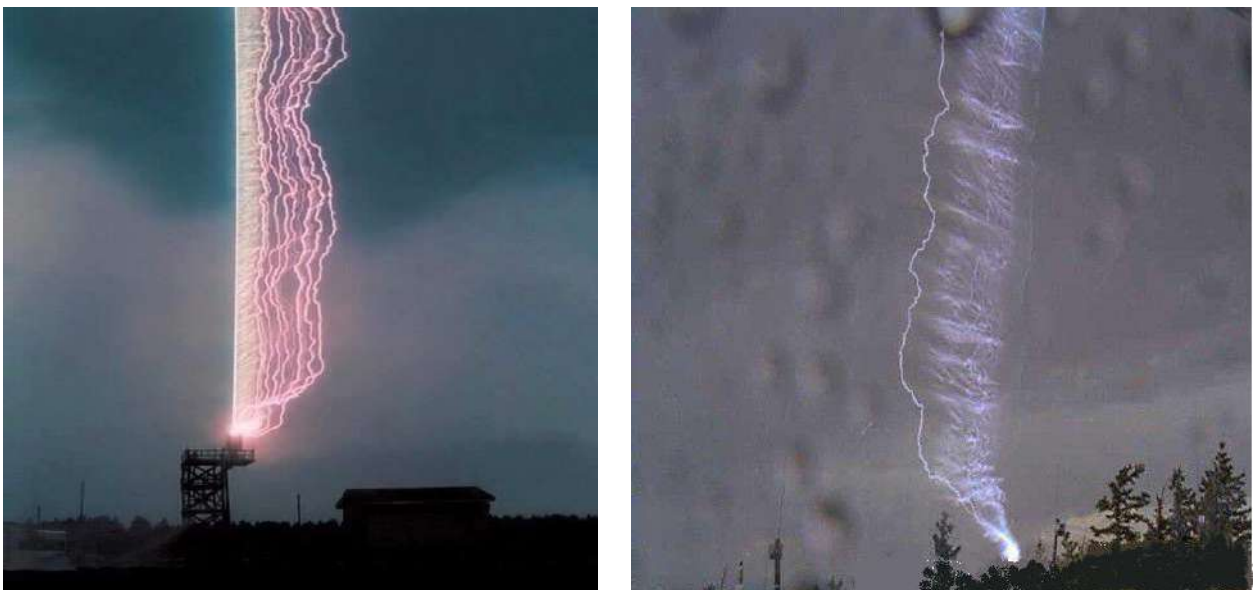


Рис. 1.26 – Фотографии типичных наземных ленточных молний

Наземные молнии сопровождается сильным раскатистым звуком — громом, напоминающим взрыв. Звук появляется в результате быстрого нагревания и расширения воздуха в канале, а затем такого же быстрого его охлаждения и сжатия.

Температура стенок газового канала, по которому происходит, мгновенно повышается до значений порядка $(15-20) \cdot 10^3$ К. При этом внутри канала линейной молнии происходит разложение молекул воды на составные части с образованием гремучего газа. «Взрывы» канала вызывают ударные волны, называемые громом. Скорость распространения грома в первые доли секунды превышает 1000 м/сек, затем ударная волна вырождается в звуковую. Раскаты грома объясняются тем, что звук приходит от взрывов в разных частях канала и его разветвлений, а также отражением звука от облаков, атмосферных фронтов.

Облачные молнии, как правило, формируются в грозовых облаках, нижняя кромка которых расположена на высоте над поверхностью земли 1,5-2 км и включают в себя обычно только лидерную стадию. Их длина может составлять от 1 км до 150 км и не сопровождается таким звуковым явлением как гром.

Иногда наблюдаются плоские молнии, когда разряд охватывает значительную часть облаков. Плоская молния представляет собой захватывающие широкую область туч световые вспышки и является следствием разряда центров скопления зарядов в окружающий воздух. Эти разряды не следует смешивать с зарницами, под которыми понимают вспышки света от далёких молний.

На рис. 1.27 и 1.29 приведены фотографии облачных и горизонтальных молний.



Рис. 1.27 – Фотографии типичных внутриоблачных молний



Рис. 1.28 – Фотографии типичных разрядов молнии «облако-облако»



Рис. 1.29 - Фотографии типичных горизонтальных молний

Доля облачных молний растет по мере смещения к экватору, меняясь от 0,5 в умеренных широтах до 0,9 в экваториальной полосе от общего количества грозовых разрядов.

Если в облаке существует электрическое поле, достаточное для поддержания разряда, но недостаточное для его возникновения, роль инициатора молнии может выполнить объект ракетно-космической техники или самолёт. Таким образом, иногда, «провоцируются» молнии в слоисто-дождевых и мощных кучевых облаках.

1.4.3 Четочная молния.

В отличие от ранее описанных видов грозовых разрядов в природе существуют разряды, относящиеся к классу так называемых длительных разрядов молний, которые сопровождаются распадом линейной молнии на отдельные яркие фрагменты, обычно называемые ***четочной*** молнией. Четочная молния известна и под другими названиями: *жемчужная молния, цепная, ожерельчатая, капельная* [1.9, 1.17].

В противоположность обычной длительности разряда молнии, измеряемой миллисекундами, свечение в этом случае длится от нескольких десятых секунды до 2 секунд, причем по одному и тому же каналу проходят как правило три отдельных разряда, каждый из которых распадается на яркие, отделенные друг от друга гранулы. Четочная молния обычно появляется между двумя тучами, образуя прерывистую линию светящихся «пятен», которая остается в течение некоторого времени после появления обычной линейной молнии. Светящиеся «пятна» имеют такой же угловой размер, как и диаметр канала линейной молнии, и, по-видимому, обладают сферической формой. Каждое «пятно» отделено от соседнего несветящейся областью. Размер темного промежутка может составлять несколько диаметров светящихся частей. Принято считать, что четочная молния возникает из канала аномальной молнии между двумя тучами. Канал разряда обычной молнии распадается на ряд не связанных друг с другом светящихся фрагментов. Законченная форма четочной молнии состоит из большого числа частей, по-видимому, существующих одновременно, а не является кажущимся результатом движения одиночного светящегося объекта с периодически меняющейся яркостью. Наблюдателям она представляется в виде устойчивого свечения вдоль траектории обычной линейной молнии, которое существует довольно долгое время после вспышки последней.

От обычной линейной или шаровой молнии четочная молния отличается рядом особенностей. Чаще всего ее прерывающаяся линия имеет волнообразный характер и выглядит как отрезок синусоиды длиной в несколько периодов. Однако такая волнообразная форма имеет место не всегда; зато типичной особенностью четочной молнии является ее «пунктирность».

Распад непрерывного столба молнии на отдельные светящиеся части связан с так называемым пинч-эффектом, радиальной неустойчивостью типа «перетяжок» — процессами, обнаруженными при изучении высокотемпературной плазмы, а также с неравномерностью остывания канала, когда более широкие места остывают медленнее, чем места «перетяжок».

На рис. 1.30 приведены фотографии фаз развития четочной молнии из линейной и внешний вид ее фрагментов.

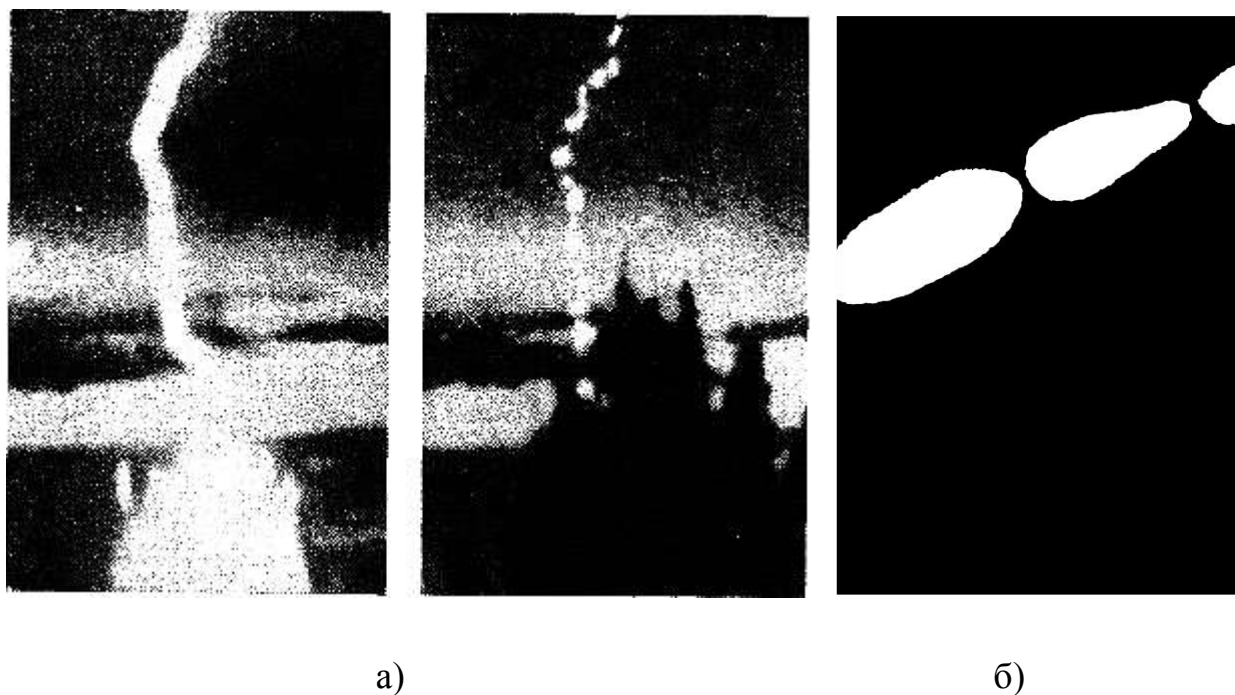


Рис. 1.30 – Фотографии фаз развития четочной молнии из линейной (а) и внешний вид фрагментов четочной молнии (б) [1.17].

На рис. 1.31 приведены фотографии четочной молнии.



Рис. 1.31 – Типичные фотографии четочной молнии.

Необычно прямая линия, вдоль которой расположены примыкающие друг к другу светящиеся шары, показывает, что зигзагообразного разряда молнии тут не было. Время существования четочной молнии 1–2 секунды. Примечательно, что траектория четочной молнии нередко имеет волнообразный характер. В отличие от линейной молнии след четочной молнии не ветвится — это является отличительной особенностью этого вида. Можно предположить, что это разновидность формируется трансформацией нисходящей положительной молнии. Важным является вопрос о закономерностях возникновения длительных разрядов молний, куда относятся четочные и шаровые молнии, в аспектах их трансформации из линейных молний.

Так, на сегодняшний день, достоверно подтверждена четкая зависимость трансформации при определенных условиях линейных молний в четочные молнии [1.17]. Что же касается подтверждения гипотезы о том, что четочная молния является переходной фазой возникновения шаровой молнии, то до сих пор нет четких сообщений о превращении четочной формы молнии в типичную шаровую (например, путем исчезновения всех четок, кроме одной, которая затем начинает перемещаться по относительно сложному

пути). По-видимому, несмотря на сходство между этими двумя формами, появление одной из них напрямую не связано с переходом в другую, хотя число наблюдений четочной молнии, на которые опирается этот вывод, невелико. Однако имеются достоверные сообщения о появлении одиночных светящихся шаров по форме соответствующих шаровым молниям в том же канале спустя несколько секунд после исчезновения линейной молнии.

1.4.4 Шаровая молния.

Физическая природа шаровой молнии до сих пор не познана. Как правило, это одиночное, стабильное и долгоживущее образование в форме шара, обладающее большой светимостью и подвижностью. По статистике, из всего населения Земли шаровую молнию видели лишь 0,1%, то есть каждый тысячный землянин. На сегодняшний день существует более 200 теорий и гипотез, объясняющих появление и существование шаровых молний [1.9, 1.17-1.20].

Все гипотезы (теории) о природе шаровой молнии можно разделить на два класса по признаку места энергетического источника, поддерживающего существование шаровой молнии. Это гипотезы предполагающие внешний источник энергии существования шаровой молнии и гипотезы, считающие, что этот источник находится внутри шаровой молнии. К сожалению, на сегодня ни одна из них в полной мере не дает научного объяснения этому загадочному явлению. Прежде всего, это связано с тем, что до настоящего времени не удалось воспроизвести или получить в лабораторных условиях искусственную шаровую молнию. В этой связи, на данном этапе в основном анализируются наблюдаемые очевидцами основные параметры шаровых молний (см. табл. 1.3), изучаются их фотографии и на основании этих наблюдений описываются их характерные особенности.

Таблица 1.3 - Наблюдаемые параметры и характерные особенности шаровой молнии [1.16]

Наблюдаемые параметры	Характерные особенности
1	2
Возникновение	Возникновение шаровых молний находится в прямой зависимости от грозовой активности. Небольшое число случаев возникновения, приходится на осенние и зимние месяцы, а также на начало весны. Поэтому с большой долей вероятности можно утверждать, что возникновение шаровой молнии больше связано с грозовой активностью, чем непосредственно с грозой.
Появление	Шаровая молния появляется там, где накапливается значительный электрический заряд, при мощной, но кратковременной эмиссии этого заряда в воздух. Большинство шаровых молний появляются из различных металлических предметов и электроприборов, (розеток электрических и радиосетей, антенн, радиоприёмников, телевизоров, батарей отопления и других приборов и металлических предметов, включенных в сеть или заземлённых). Часто шаровая молния появляется при разряде линейной молнии. Или ее появлению может предшествовать интенсивное коронирование проводников (огни святого Эльма).
Форма	В большинстве случаев это шар, хотя фиксировались и другие формы: гриб, груша, капля, тор, диск, эллипсоид и т.п. Шар..... 89.7% Эллипсоид..... 5.9% Грушевидная форма..... 2.4% Неправильная форма..... 1.6% Иные формы..... 0,4%
Цвет	Большая часть молний - около 60% - испускает видимый свет, к красному концу спектра (красный, оранжевый или желтый). Около 15% испускает цвет в коротковолновой части спектра (голубой, реже синий, фиолетовый, зелёный). Приблизительно в 25% случаев молния имеет белый цвет. Мощность излучаемого цвета - порядка нескольких ватт.
Размер	Наиболее вероятный диаметр шаровой молнии варьируется в пределах от 10 до 20 см, реже встречаются экземпляры с размером 2 - 10 см и 20 - 35 см.
Температура	Температура шаровой молнии (не считая момента «взрыва») лишь относительно незначительно превышает температуру окружающего воздуха, достигая, по-видимому, всего нескольких сотен градусов.
Вес	5-7 грамм в независимости от линейных размеров.
Плотность	Практически равна плотности окружающего воздуха или лишь немного превышает её.

1	2
Вещество	Вещество шаровой молнии является проводником с низкой работой выхода зарядов и поэтому обладает свойством легко рассеивать электрические заряды, накопившиеся на других проводниках. Вещество шаровой молнии образует обособленную фазу в воздухе, обладающую значительной поверхностной энергией. Кроме того, на поверхности шаровой молнии нередко наблюдаются поверхностные волны. При достаточно большой амплитуде эти волны приводят к выбрасыванию капель вещества с поверхности, аналогичных брызгам жидкости.
Запас энергии	Запас энергии в шаровой молнии может составлять от нескольких килоджоулей до нескольких десятков килоджоулей, в некоторых случаях, возможно, до ста килоджоулей.
Электромагнитные факторы	Контакт шаровой молнии с заряженными проводниками приводит к появлению кратковременных импульсов электрического тока. Электрические заряды стекают со значительной площади через вещество шаровой молнии и рассеиваются в атмосфере. Взрыв шаровой молнии почти во всех случаях является следствием такого кратковременного электрического разряда. Поражения шаровой молнией людей и животных также связаны с импульсом тока, который она вызывает. Шаровая молния также является интенсивным источником электромагнитного излучения вплоть до сверхвысокочастотного. Это вызывает перегорание предохранителей, срабатыванию реле, выход из строя электроприборов, телефонов, радиоприемников, телевизоров, Низкочастотные излучения могут воздействовать и на психику человека, вызывая галлюцинации, головную боль, чувство страха.
Теплообмен	Теплообмен шаровой молнии с окружающей средой происходит через испускание значительного количества инфракрасного излучения.
Скорость передвижения	подавляющее большинство молний имеет небольшую среднюю скорость - меньше чем 2 м/с. Молнии, имеющие среднюю скорость меньше чем 0.1 м/с т.е. практически неподвижные, встречаются крайне редко.
Звуковые эффекты	В течении своей жизни шаровая молния иногда производит шипение, жужжание или прерывистый звук. Процесс распада (исчезновения) может произойти со взрывом или тихо;
Время жизни	Существует две группы молний, одну из которых условно называют коротко живущей с периодом полураспада 7,5 с, а вторую - долго живущей с периодом полураспада 40 с. Обе группы были представлены в наблюдениях примерно в одинаковых количествах: короткоживущие - 57%, долгоживущие -43%.

1	2
Поведение	<p>Шаровая молния может двигаться и зависать, не касаясь электропроводных предметов на некотором расстоянии от них, при этом часто ветер не оказывает на нее никакого влияния. Шаровая молния может проходить сквозь диэлектрики (стекло и прочее) иногда повреждая, иногда не повреждая их, вследствие чего, может проникать в жилые помещения самолеты. Передвигается в зависимости от внешних условий и подвержена разнообразным воздействиям, начиная от земного притяжения и заканчивая электромагнитным полем. Неподвижные (малоподвижные) молнии, прошедшие за время наблюдения расстояние меньше одного метра, встречались в 9% от общего их числа. Молнии, прошедшие расстояние от одного до десяти метров, составляет 46.3% - эти молнии наблюдались, нередко внутри помещений. Около 20% общего числа наблюдений составляли молнии, прошедшие расстояние более пятидесяти метров. За время жизни шаровая молния может (при условии, что её движение не ограничено стенами помещений) пройти расстояние в несколько десятков и даже более сотни метров. Чаще всего шаровую молнию видели движущейся горизонтально, однако нередко она опускается вниз и только изредка поднимается вверх. Чаще наблюдается плавное движение, чем скачкообразное.</p>
Распад	<p>Исчезает шаровая молния в результате взрыва, развития неустойчивостей или из-за постепенного расходования запаса её энергии и вещества. Взрыв может быть следствием интенсивного распада при прохождении через молнию кратковременного импульса тока, нейтрализующего заряды, накопившиеся на окружающих телах.</p>

На рис. 1.32 приведены фотографии шаровых молний в различных типичных средах их формирования и существования.



а) – в лесу



б) - в среде обитания человека



в) - на железной дороге.

Рис. 1.32 - Фотографии типичных шаровых молний
(Сайт: ru.depositphotos.com ›)

1.4.5 Сверхмолнии

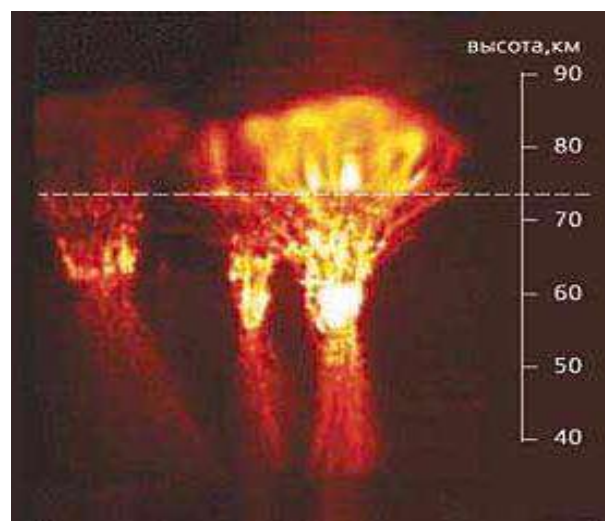
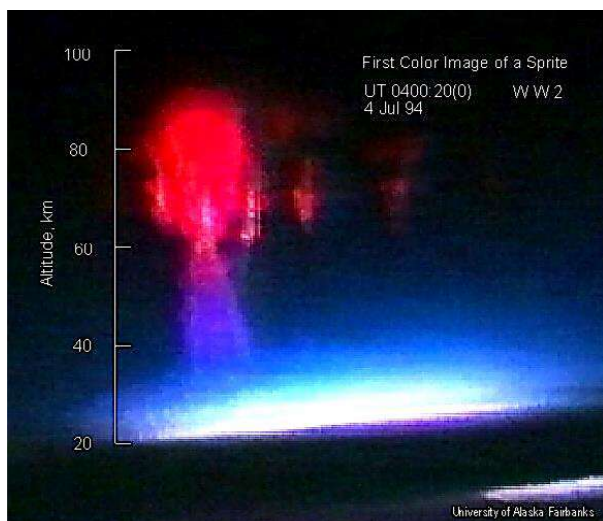
Это мало изученные разновидности грозовых разрядов, направленных вверх от грозовых облаков. Подразделяются на красные спрайты, синие джеты (струи) и эльфы. Окраска вспышек и их форма зависят от высоты, на которой они происходят. В отличие от наблюдаемых на Земле молний, эти вспышки покрывают большие пространства в верхних слоях атмосферы, а иногда простираются до границы с космосом на высоту до 100 км.

Первые сообщения метеорологов о таких молниях появились еще в 1920 году, но только в 70-х годах, после запуска советских (серия «Космос») и американских спутников со специальной аппаратурой, удалось зарегистрировать эти интенсивные вспышки света.

В отличие от наблюдаемых на Земле молний, эти вспышки имеют яркий цвет, обычно красный или синий, и покрывают большие пространства в верхних слоях атмосферы, а иногда простираются до границы с космосом. Свои названия вспышки получили в зависимости от их окраски, формы и высоты, на которой они происходят.

Красные спрайты – это оптическое явление в мезосфере, развивающееся над грозовым облаком и обычно достигающее высоты 90 км, или выше в E области ионосферы. Спрайты преимущественно красные, наиболее яркая часть – голова (66 - 74 км), выше – тонкие светящиеся линии – волосы. Под головой – темная полоска – воротник (ожерелье), ниже – усы, которые простираются до 40-50 км и меняют цвет от красного, до – голубого (внизу). Спрайты бывают одиночные, однако чаще бывают двойные и тройные. В поперечнике они достигают 40 км.

На рис. 1.33 приведена фотографии одиночного и тройного красного спрайта.



а)

б)

Рис. 1.33 – Фотография одиночного красного (а) и тройного (б) красного спрайта (По: Pasko V.P., Stenbaek-Nielsen H.C. // Geophys. Res. Lett. 2002. V.29 (A10); doi: 10.1029/2001GL014241).

Голубые джеты (их также называют синими струями) Для наблюдателя они выглядят так, словно молния бьет из облака не на Землю, а в космос (в его электросферу), образуя гигантский долгоживущий, по сравнению с обычной вспышкой молнии, столб синего (голубого) света над облаками. Их мощность достигает миллиона кВт.

Эти молнии возникают, когда грозовое облако находится над тропосферой, на высоте 12-15 км, более характерной для гроз в тропиках, и тяготеют к тем участкам стратосферы, где развиваются квазиэлектростатические процессы.

Данный вид грозовых разрядов на сегодняшний день наиболее наблюдаем. На рис. 1.34 приведена покадровая развертка процесса развития гигантской молнии типа голубой джет, который был зафиксированный в верхних слоях атмосферы группой американских ученых на видео.

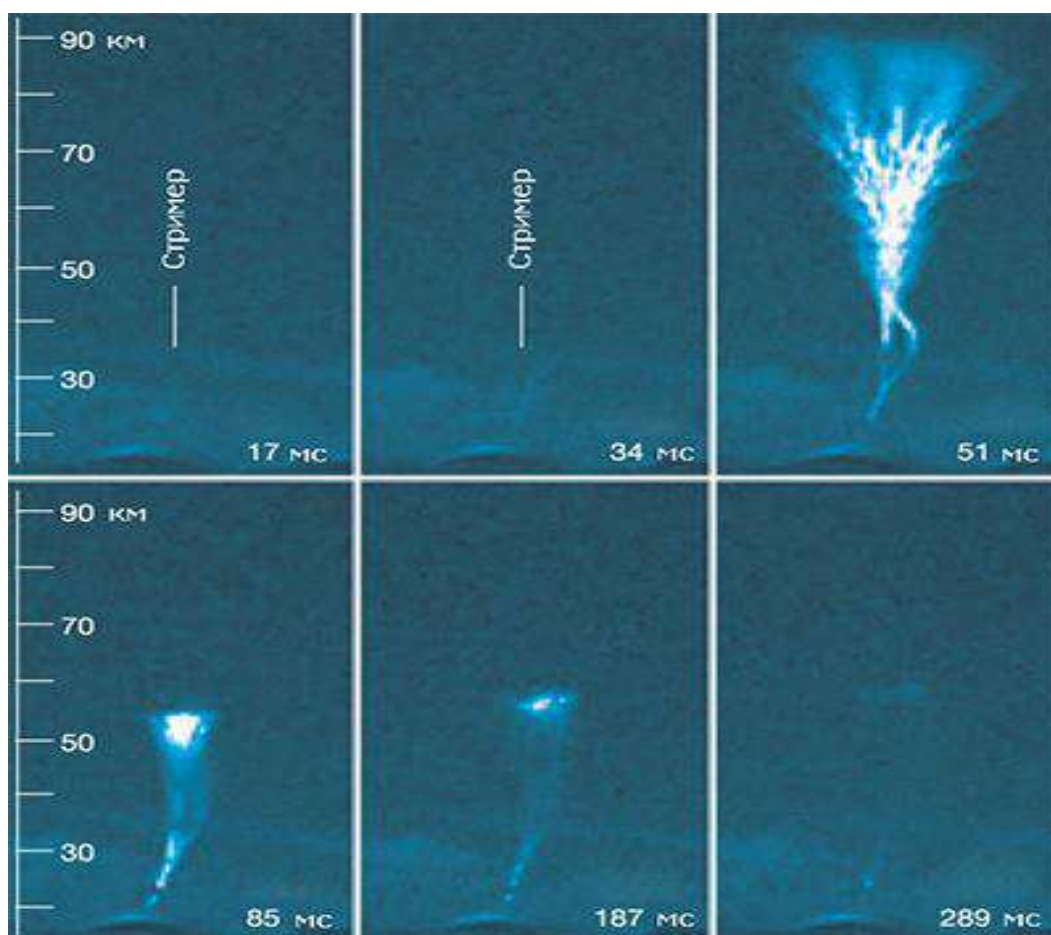


Рис. 1.34 – Процесс развития гигантского голубого джета (science.compulenta.ru/452139)

Гигантские джеты распространяются быстрее и дальше, чем наземные молнии, поскольку разреженный воздух в верхних слоях атмосферы имеет меньшее сопротивление. Длина зарегистрированного канала разряда составила около 75 км, а величина перенесенного за одну секунду по этому каналу заряда — приблизительно 144 Кл. «Источником» разряда стала грозовая туча на высоте 14 км.

Самое большое скопление — пять гигантских 60–70-километровых джетов — наблюдали в 2002 году над Южнокитайским морем.

Эльфы — малоизученное проявление грозовой активности в высоких слоях атмосферы. Представляет собой красноватые кольцообразные вспышки. Возникает как слабое красноватое сияние в атмосфере над грозовым облаком на высоте 100 км (рис. 1.35).



Рис. 1.35 – Фотография эльфа

https://s00.yaplakal.com/pics/pics_original/1/8/3/218381.jpg

По форме это огромные, но слабосветящиеся вспышки-конусы диаметром около 400 км, которые появляются непосредственно из верхней части грозового облака. Высота эльфов может достигать 100 км, длительность вспышек — до 5 мс (в среднем 3 мс).

1.4.6 Разряды молний не грозового происхождения

Данный вид молний включает в себя: *вулканические молнии, молнии пыльных бурь, снеговые молнии и молнии от наземных и приземных ядерных и термоядерных взрывов.*

Вулканические молнии. Этот вид молний часто называют «грязными молниями». В зависимости от того, что является областью формирования этих разрядов они делятся на два подвида. Первый подвид вулканической молнии возникает вследствие того, что пузыри магмы, выбрасываемые вверх, электризуются трением и непосредственно в извергающейся магме наблюдаются разряды молнии аналогичные линейной молнии (рис. 1.36).



Рис. 1.36 – Разряды вулканической молнии в извергающейся магме

Второй подвид вулканической молнии возникает непосредственно в облаке пепла при извержении вулкана. Вулканический пепел, который переносит электрический заряд. При его движении за счет электризации возникают разноименные по знаку разделенные области. Также выдвигается гипотеза, что вулканические молнии могут быть вызваны наводимыми зарядами за счет столкновений частиц вулканической пыли (рис. 1.37).



Рис. 1.37 – Разряды вулканической молнии между извергающимся облаком пепла и землей.

Молнии пыльных бурь и торнадо. Источником разрядов молнии не грозового происхождения являются торнадо, пыльные и песчаные бури. В этом случае в качестве формирования разрядов молнии выступают пыльные и песчаные объемные образования, электризация которых происходит в процессе трения за счет их перемещения и поднятия в пространстве сильными потоками ветра.

В данном случае, процесс электризации пыльных (песчаных) масс, зависит от свойств частиц пыли или песка, структуры электризуемого материала, значения их диэлектрической проницаемости, объемной и поверхностной электрической проводимости, а также от ряда внешних факторов, например, от размера контактной поверхности, интенсивности трения, силы сжатия тел перед разделением, скорости разведения, температуры, влажности воздуха. Причем, последнее, имеет очень большое значение.

Молнии пыльных бурь и торнадо подразделяются на две разновидности:

- *ветвистые молнии* аналогичные по внешнему виду типичным линейным молниям «облако-земля» (рис. 1.38);

- *гладкие молнии* лишенные типичных для разрядов такого вида разветвлений (рис. 1.39).



Рис. 1.38 – Разряды ветвистых молний при пыльной бури



Рис. 1.39 – Разряд гладкой молнии при торнадо

Если первая разновидность разрядов молнии довольно хорошо вписывается в общую теорию длинных искр (разрядов), то возникновение гладких молний представляет собой аномальный процесс.

Во-первых, мощные вихри (категории EF3 по шкале Фуджиты, и выше) сопровождаются относительно слабой грозовой активностью, а примерно 20% от всех проанализированных случаев⁸, совершенно лишены разрядов типа «облако-земля». Но внешний вид большинства молний, которые разряжаются в месте формирования смерча или в непосредственной близости от него, выглядят очень гладкими, лишёнными разветвлений. словно молния распространяется по уже давно сформированному каналу между небом и землёй. При этом, доля таких разрядов очень мала.

Имеется несколько версий относительно причин столь необычного внешнего вида канала молнии. По одной из них⁹ это связано с высокой скорости движения воздушных потоков (горизонтальной и вертикальной) при генерации торнадо, что приводит к выравниванию (гомогенности) подоблачного слоя воздуха и равномерному распределению ионов, поэтому для молнии нет нужды ветвиться. А если учесть, что при бурных вертикальных

⁸ Источник stormtrack.org

⁹ Источник meteoclub.ru

движениях (конвекции) воздух сильно ионизируется, то вырисовывается вполне понятная картина: при таких процессах наблюдается равномерное распределение ионов в подоблачном слое, а также сильно возрастает само количество этих ионов, что в комплексе приводит к возникновению таких «гладких» линейных молний, поскольку электропроводность среды также существенно возрастает.

По другой¹⁰, вероятнее всего, гладкие молнии - это подтип восходящих молний положительной полярности (в которых лидеры направлены к облаку, а не в сторону земли). Такие молнии возникают с высоких сооружений, например, телевизионных вышек. Такие молнии связаны с мощной конвекцией и чаще всего именно с суперячейковыми грозами. В них генерируются огромные зоны с положительным зарядом (в массивной наковальне), а мощные нисходящие потоки и сдвиг ветра приводят к смещению основной области положительных зарядов ближе к поверхности земли и электрическая структура такого облака становится как бы опрокинутой: основная область положительного заряда расположена выше основной области отрицательного заряда, а не над ней, возникает "перевернутый триполь" (см. рис. 1.17). Когда такое происходит, то подавляющая часть молний становится положительной полярности с визуально гладким каналом. И ещё один интересный момент - данный подвид молний состоит обычно только из 1 импульса при средней норме 3-5 импульсов.

Как следует из выше изложенного, в последние годы наука продвинулась ещё на несколько шагов вперёд в исследовании атмосферного электричества.

Снеговые молнии. Данный вид молний возникает при *снежных* грозах — очень редком метеорологическом явлении, когда вместо ливневого дождя выпадает ливневый снег. При этом отмечается одновременно гроза и ливневый снег. Термин используется в основном в научно-популярной и зарубежной литературе (англ. thundersnow). В профессиональной российской и отечественной литературе по метеорологии данный термин отсутствует.

Принято считать, что грозы в Средней полосе – явление исключительно летнее, которое можно наблюдать только в теплое

¹⁰ <http://stormtrack.org/community/threads/smooth-channel-lightning-any-science.26869/>!

время года. Но это утверждение ошибочное. Иногда в холодное время года в наших краях отмечаются отдельные вспышки молний и по-летнему раздаются раскаты грома, хотя на полях лежит снег, а дневные температуры лишь на несколько градусов поднимаются выше нуля. Иногда такие грозы называют снежными. Снежные грозы случаются с ноября по март, когда погода имеет зимний характер. Явление это довольно редкое. Средняя повторяемость таких гроз для каждого зимнего месяца - один раз в 5-10 лет.

С какими же атмосферными процессами связаны эти необычные явления? По мнению синоптиков, они связаны с вторжением холодных атмосферных фронтов в теплую воздушную массу. Такие фронты движутся со скоростями до 40-50 км/час. При соприкосновении холодного и теплого воздуха в условиях неустойчивой атмосферы отмечаются резкие перепады температуры (на высоте в несколько километров перепады могут достигать нескольких десятков градусов). Как и летом, начинают развиваться мощные кучево-дождевые облака, но, как правило, затопленные в слоисто-дождевую облачность, следствием чего является развитие грозовой активности, сопровождаемой не только молниями и громом, но и ливневыми снегопадами. После этих явлений обычно наступает понижение температуры и рост атмосферного давления, прекращение осадков, а также могут появляться прояснения.

Упомянутые холодные фронты, как правило, связаны с глубокими атлантическими циклонами, реже - со средиземноморскими.

Зимние грозы, в отличие от весенних и летних, возникают не повсеместно, а только в такой местности, где и для летних гроз имеются особо благоприятные условия и прежде всего - наличие на пути их движения невысокого горного препятствия, способствующего холодному воздуху теснить вверх более тёплый, влажный воздух. Вот почему в равнинной части зимние грозы практически отсутствуют, но они известны под Санкт-Петербургом у Пулковских высот, в Крыму на северных склонах Яйлы, в предгорьях Карпат. Западные склоны Урала пересекают "дороги" фронтальных гроз, поэтому в Предуралье в среднем за год наблюдается 30 гроз, а за Уралом их вдвое меньше¹¹.

¹¹ Е.Ф. Зубков ("Календарь-справочник Пермской области" 1963 года)

На рис. 1.40 приведены фотографии снеговых молний наблюдаемых на территории средней пловы.



Рис. 1.30 – Фотографии разрядов снеговых молний

Молнии от наземных и приземных ядерных и термоядерных взрывов. Причиной возникновения молний при наземных и приземных ядерных взрывах, идущих снизу-вверх от поверхности земли к облаку взрыва, можно объяснить также, как и при типичных грозовых разрядах, электризацией частиц окружающей среды которая происходит при ***ионизации*** окружающей среды от внешних мощных источников ядерных или термоядерные взрывов.

По одной теории за счет гамма-излучения возникают быстрые комптоновские электроны, воздействие которых на мелкодисперсные компоненты пылевого облака и окружающий воздух вызывают их ионизацию и, соответственно, разделение зарядов. Формируется сильное радиальное электрическое поле.

Согласно другой теории разделение зарядов происходит за счет зависимости величины объемного заряда частиц от скорости их движения, вытекающего из теории пространства-времени. Согласно этой теории¹² заряд движущихся частиц при ядерном взрыве уменьшается с увеличением скорости. Скорости электронов в плазме ядерного взрыва значительно превосходят скорости ядер атомов. Вследствие этого баланс заряда смещается в сторону положительного заряда ядер атомов. Ибо заряд электронов

¹² www.fizportal.ru/qualitative-565

уменьшается из-за того, что скорости электронов больше скоростей ядер атомов. Поскольку земная поверхность заряжена отрицательно (избыток электронов), то при образовании положительно заряженного облака (облако взрыва) электроны с поверхности земли устремляются вдоль линий напряженности электрического поля по направлению к положительно заряженному облаку взрыва (в виде молний).

На рис. 1.41 и 1.42 приведены фотографии молний, возникших при наземных термоядерных взрывах и приземных ядерных взрывах.

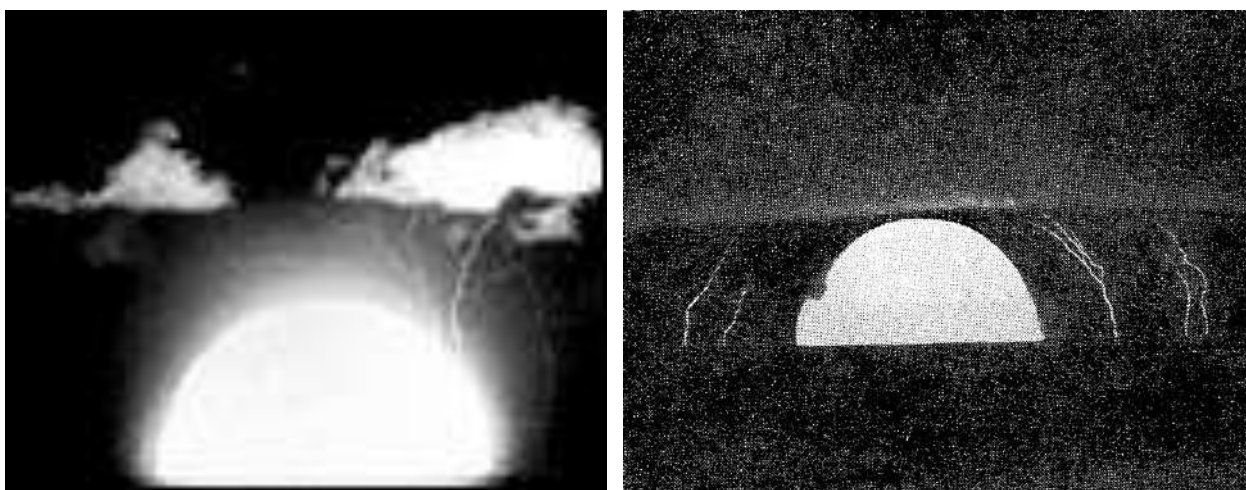


Рис. 1.31 – Молнии, вызванные наземными термоядерными взрывами [1.15].



Рис. 1.32 – Молнии, вызванные приземными ядерными взрывами [<http://www.acmephysics.narod.ru/im/3466.jpg>].

1.5 Линейные молнии

Линейные молнии – «облако-земля», «земля-облако», «облако-облако», а также внутриоблачные и горизонтальные грозовые разряды представляют наибольшую опасность с точки зрения их поражающего воздействия и дестабилизирующего влияния на летательные аппараты и объекты инфраструктуры в процессе их эксплуатации (рис. 1.43).

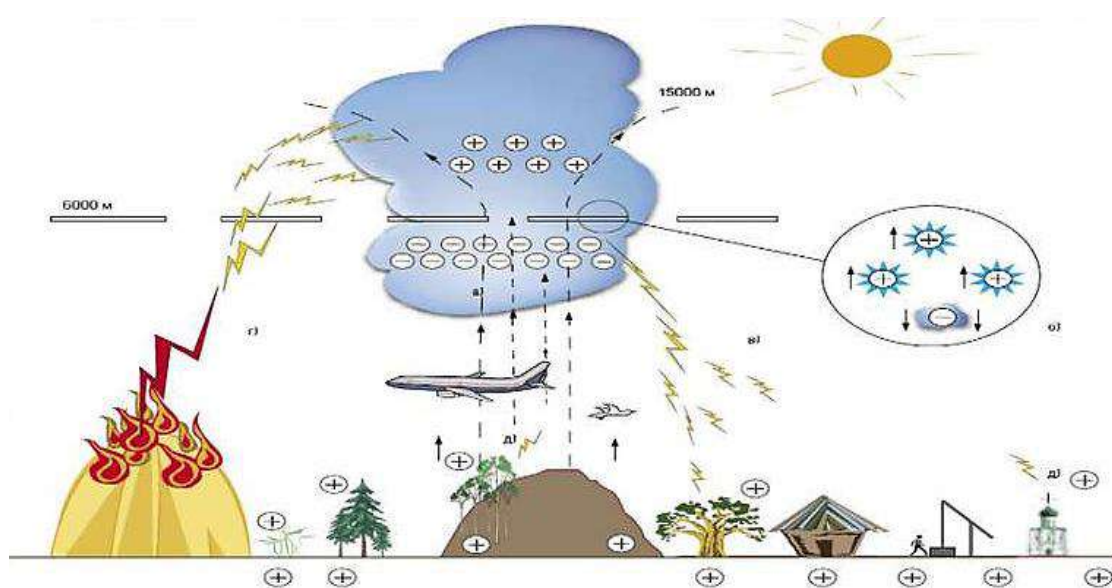


Рис. 1.43 - Поражающие воздействия и дестабилизирующие влияния линейных молний на окружающую среду
[<http://molnia.kiev.ua/images/stories/molniezashita/razrayd-molnii.jpg>]

1.5.1 Наземные линейные молнии

С точки зрения определения электромагнитных поражающих факторов грозовых разрядов наземные линейные молнии представляют наибольший интерес. Прежде всего, это связано с тем, что данные виды грозовых разрядов по значениям наблюдаемых параметров, последствиям их поражающих воздействий на объекты и возникающим по этим причинам аварийных ситуаций лидируют среди остальных видов молний.

Такие экзотические явления, как четочные или шаровые молнии, возникают по сравнению с другими грозовыми явлениями достаточно редко и не могут быть причиной систематических аварий

наземных сооружений, а также поражений объектов ракетно-космической и авиационной техники.

Межоблачные и внутриоблачные молнии по своим энергетическим характеристикам значительно уступают наземным молниям и также в большинстве случаев, *кроме специально оговоренных*, не принимаются во внимание при реализации организационно-технических мероприятий грозозащиты.

На сегодняшний день не были зафиксированы последствия поражающих воздействий на окружающую среду сверхмолний – гигантских голубых джетов, красных спрайтов и эльфов.

В этой связи, из всех грозовых явлений, описанных ранее и представляющих опасность для жизнедеятельности человека во всех ее проявлениях, на сегодняшний день выделяют *наземные линейные молнии*.

Данный вид грозовых разрядов развивается между облаком и землей и по направлению формирования может быть нисходящим и восходящим. Нисходящие молнии возникают в грозовых облаках и развиваются по направлению к земле. Напротив, восходящие молнии возбуждаются у вершин высоких (высотных) заземленных объектов, зданий и сооружений и развиваются по направлению к облакам.

Помимо этого, наземные линейные молнии, в независимости от пути их развития, подразделяются на молнии отрицательной и положительной полярности. Полярность молнии принято определять по знаку заряда, переносимого от облака на землю по ее каналу. Как показывают измерения, большинство молний (до 90%) независимо от типа их развития, топографии местности и ее географической широты переносят на землю отрицательный заряд [1.21].

1.5.1.1 Линейная молния отрицательной полярности

Пример тока обратного удара в нескольких разрядах отрицательной молнии схематически показан на рис. 1.44.

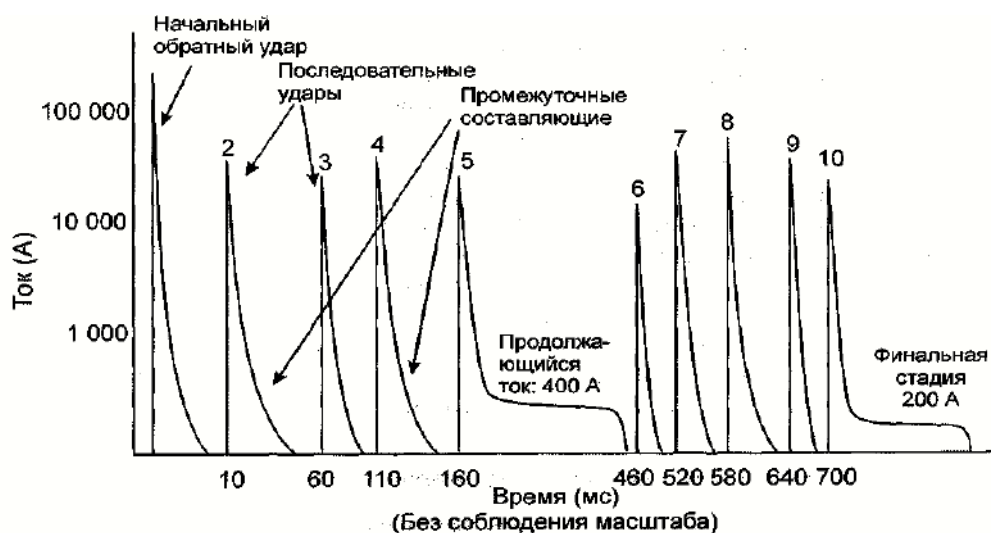


Рис. 1.44 - Модель формы сигналов тока нескольких ударов отрицательной молнии [1.12].

Количество ударов в разряде отрицательной молнии обычно составляет от 1 до 11, среднее количество равно 3, а максимальное количество достигает 24. Общая продолжительность удара составляет от 20 мс до 1 секунды, а средняя продолжительность равна 0,2 секунды. Интервал времени между ударами обычно составляет 60 мс. Существует некоторая корреляция между этими параметрами: разряды молнии с наибольшим количеством ударов имеют тенденцию быть самыми продолжительными. Время нарастания импульса первого удара составляет приблизительно 2 мкс, а время спада (до половины амплитуды пика) составляет 40 мкс. Последующие удары во вспышке (разряде) молнии имеют тенденцию к более высоким скоростям нарастания импульсов, хотя их амплитуды будут меньше, чем у начального удара, и они могут, следовательно, быть достаточно большими для наводки напряжений в проводах, где напряжения, наведенные в индуктивно связанных проводах, пропорциональны скорости изменения тока молнии. Около окончаний некоторых ударов в разряде отрицательной молнии часто наблюдаются токи с низким уровнем величиной несколько кА, продолжающихся в течение нескольких миллисекунд и известных, как «промежуточные составляющие тока».

После некоторых ударов протекает «сопровождающий ток» амплитудой от 100 до 400 А и продолжительностью от 100 до 800 мс, благодаря чему в этой фазе процесса происходит существенный перенос заряда. Особенно общим для развития

молнии является наличие «продолжающегося тока» после последнего удара.

Обобщение сведений заключается в том, что прежде, чем сможет произойти повторный удар, «сопровождающий ток» должен прекратиться.

Обычно у нисходящей отрицательной молнии выделяются три основные стадии развития: лидерная, главная и финальная (рис. 1.45).

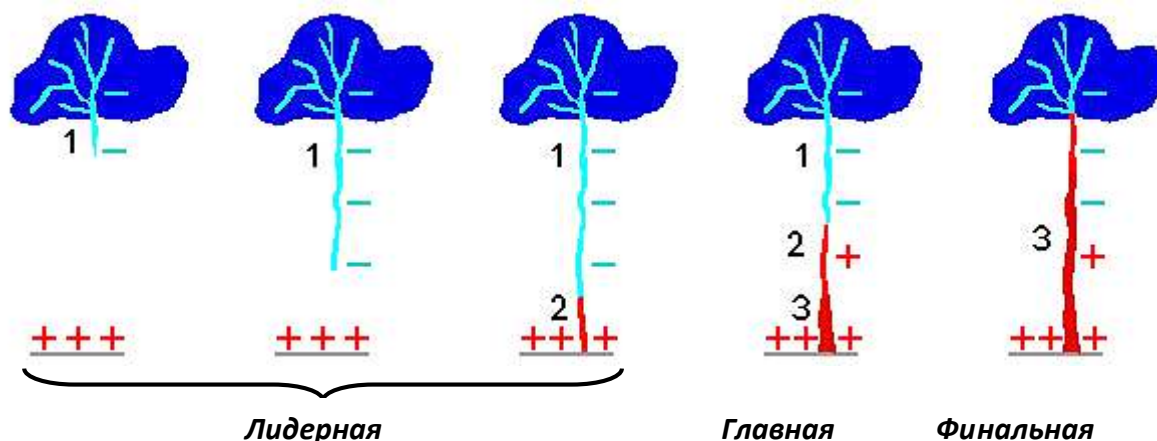


Рис. 1.45 – Стадии развития нисходящей отрицательной молнии

Лидерная стадия молнии начинается в локальных областях нижней кромки грозового облака, когда в этих областях напряженность электрического поля достигает критического для изоляционных свойств воздуха значений (при нормальном атмосферном давлении порядка 30 кВ/см), что приводит к возникновению процесса ударной ионизации.

Этот процесс непосредственно связан с наличием в воздушном пространстве свободных электронов, которые под действием электрического поля приобретают значительные скорости по направлению к земле и, сталкиваясь с атомами воздуха, ионизируют их. Ионизация происходит в узком канале, который становится проводящим. Электронные лавины, формируют нити электрических разрядов - стримеры, представляющие собой хорошо проводящие каналы, которые, сливаясь, дают начало яркому термоионизованному каналу с высокой проводимостью - ступенчатому лидеру.

Движение лидера к земной поверхности происходит скачкообразно, в среднем на расстояние 50 м со скоростью ~

$1,5 \times 10^5$ м/сек, после чего его движение приостанавливается на несколько десятков микросекунд, а свечение сильно ослабевает. Затем лидер снова продвигается на несколько десятков метров. Яркое свечение охватывает при этом все пройденные ступени. Далее следуют снова остановка и ослабление свечения. Таким образом, продвижение лидера к поверхности земли осуществляется ступенчато. Средняя скорость его движения порядка 2×10^5 м/сек. Данный процесс соответствует формированию первой компоненты молнии и носит название ступенчатого лидера.

По мере продвижения ступенчатого лидера к земле напряжённость поля на его конце головки лидера усиливается, и под его воздействием из выступающих на поверхности земли предметов выбрасывается ответный стример, соединяющийся со ступенчатым лидером.

По каналу, созданному ступенчатым лидером отрицательный заряд из облака стекает к земной поверхности. Это *первая – лидерная стадия* процесса развития отрицательной нисходящей молнии.

После достижения ступенчатым лидером земли, по сформированному им проводящему каналу от ее поверхности вверх к облаку распространяется обратный или главный разряд молнии. Импульс тока главной стадии молнии изменяется в пределах от десятков до сотен тысяч ампер и имеет длительность сотни микросекунд. Он характеризуется большой скоростью распространения по каналу лидера, от 10^8 м/сек в начале процесса, до 10^7 м/сек в конце. Именно в это время происходит нейтрализация отрицательного заряда канала ступенчатого лидера положительными зарядами, индуцированными на поверхности земли отрицательными зарядами грозового облака. Канал разряда характеризуется значительную яркостью, заметно превышающей яркость лидера, и при этом возникает мощный звуковой эффект – гром. Это *вторая – главная стадия* процесса развития отрицательной нисходящей молнии.

После прохождения импульса тока обратного разряда ионизация канала и его свечение ослабевают. Наступает *третья – финальная стадия* процесса развития отрицательной нисходящей молнии. В финальной стадии, ее еще называют стадией послесвечения, через постепенно теряющий свою проводимость канал молнии стекает в землю в течение сотен микросекунд около 40% остаточного

отрицательного заряда, участвующего в предыдущих стадиях процесса развития нисходящей молнии. Ток молнии финальной стадии может длиться десятые и сотые доли секунды, составляя по амплитуде сотни ампер.

Три перечисленные стадии образуют первую компоненту нисходящей отрицательной молнии. Как правило, разряд молнии не заканчивается на первой компоненте, за ней может следовать несколько так называемых последующих компонент (повторных разрядов). Последующие компоненты при своем формировании используют уже имеющийся канал между облаком и землей, оставшийся от первой компоненты.

Возникновение последующих компонент разряда молнии связано с тем, что главный разряд разряжает нередко только часть облака. Заряды, расположенные на больших высотах, дают начало новому, но уже стреловидному лидеру, движущемуся непрерывно к земле со скоростью в тысячи километров в секунду. Яркость его свечения близка к яркости ступенчатого лидера. Когда стреловидный лидер доходит до поверхности земли, следует второй главный удар, подобный первому. Обычно молния включает несколько повторных разрядов, и их число может достигать нескольких десятков. Общая длительность многократной молнии может превышать 1 сек.

На рис. 1.46 приведена схема развития трехкомпонентной нисходящей наземной молнии отрицательной полярности.

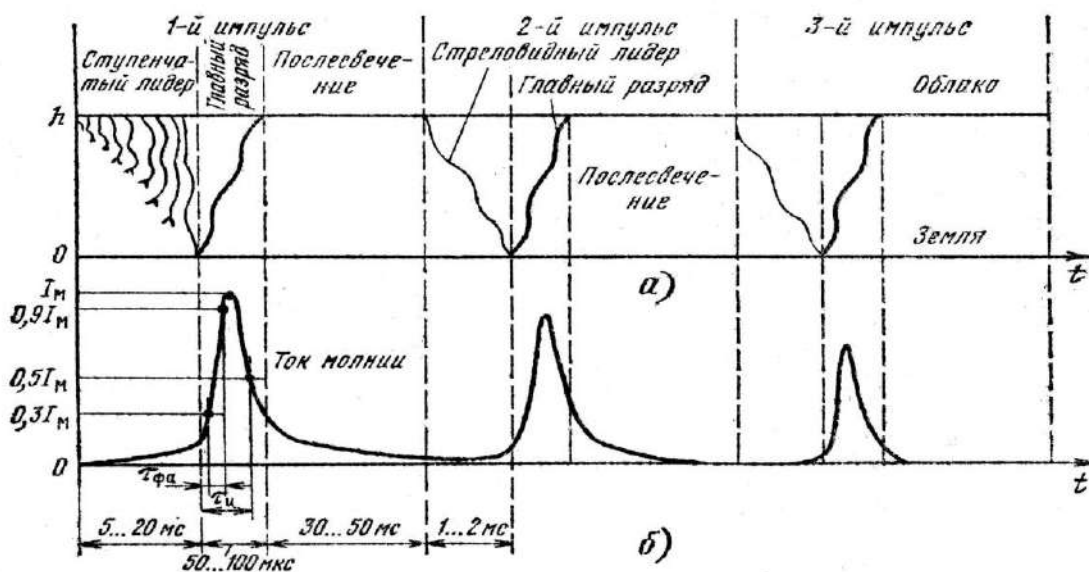


Рис. 1.46 - Схема развития трехкомпонентной нисходящей наземной молнии отрицательной полярности.
а – оптическая картина; б – ток молнии.

Наблюдаемые и регистрируемые численные параметры молнии носят вероятностный характер и представляются либо в табличном или чаще графическом видах. В табл. 1.4 приведены численные характеристики нисходящей отрицательной молнии.

Таблица 1.4 - Численные значения параметров нисходящей отрицательной молнии [1.22]

Регистрируемый параметр	Минимальный	Характерный	Максимальный
1	2	3	4
Грозовое облако			
Отрицательный заряд, нейтрализуемый за вспышку молнии, Кл	10	40	200
Потенциал, В	$3 \cdot 10^7$	10^8	10^9
Высота расположения над поверхностью земли центров скопления зарядов, км			
нижних положительных	1,5	2	5
средних отрицательных	2	4	8
верхних положительных	5	8	12
Расстояние между центрами нижних и верхних положительных зарядов, км	5	10	18
Ступенчатый лидер			
Длина ступени, м	3	50	200
Интервал времени между ступенями, мкс	30	50	120
Скорость распространения, м/с	10^5	$1,5 \cdot 10^5$	10^6
Переносимый заряд, Кл	3	5	20
Стреловидный лидер			
Скорость распространения, м/с	10^6	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$
Переносимый заряд, Кл	0,2	1	6
Главная стадия			
Скорость распространения возвратного удара, м/с	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$
Скорость нарастания тока, кА/мкс	1	10	120
Время, соответствующее максимальному значению тока, мкс	0,1	2	20
Амплитуда тока, кА			
первый разряд	5	30	200
последующие разряды	2,5	15	100
Время разряда, мс	5	50	100
Время полуспада импульса тока, мкс	10	50	250
Длина канала молнии, км	1,5	4,5	14
Диаметр канала молнии, см	0,1	5	12
Переносимый заряд, за исключением непрерывного (сопровождающего) тока, Кл	0,2	2,5	20
Удельная проводимость канала, См/м	$4 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$
Волновое сопротивление канала, Ом	100	200	300

1	2	3	4
Вспышка молнии			
Число единичных разрядов по одному каналу молнии	1	3	26
Интервал времени между единичными разрядами молнии, мс	3	60	100
Продолжительность вспышки, с	0,01	0,2	2
Переносимый заряд, включая непрерывный ток, Кл	3	25	90

Восходящая отрицательная молния. Развитие отрицательной восходящей наземной молнии имеет много общего с процессами развития аналогичной нисходящей молнии. Однако первая компонента восходящей отрицательной молнии, которая формируется в основном с высоких объектов по направлению к облаку, состоит из лидерной и финальной стадии (стадии послесвечения), и, соответственно, не содержит главной стадии (рис. 1.47).

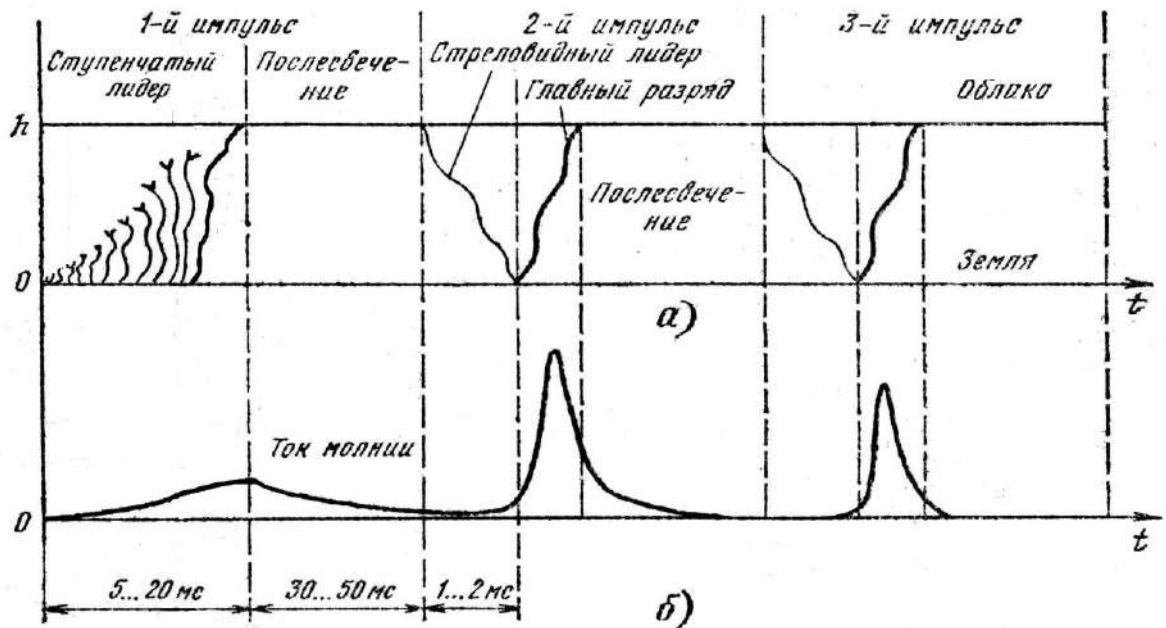


Рис. 1.47 - Схема развития трехкомпонентной восходящей наземной молнии отрицательной полярности.
а – оптическая картина; б – ток молнии.

Это объясняется тем, что ее лидер по завершению своего развития соприкасается не с проводящей поверхностью земли, где всегда имеется достаточно большое количество свободных зарядов, а с малопроводящим облаком. Лидер последующих компонент восходящих молний всегда продвигается от облака к земле, и потому структура этих компонент не отличается от структуры последующих компонент нисходящей молнии.

1.5.1.2 Линейная молния положительной полярности

Положительная молния, как более редкое явление изучена значительно слабее отрицательной молнии. Определенно выделяют лидерную стадию восходящей и нисходящей положительной молнии. Что касается разделения последующих процессов на главную и финальную стадии, то это не всегда удается осуществить. Лидерные процессы нисходящей и восходящей положительных молний по своим амплитудным и временным характеристикам мало чем отличаются от аналогичных видов отрицательных молний.

Различают два вида импульсов тока главной стадии положительной молнии.

К первому виду относятся импульсы тока по форме и амплитудно-временным характеристикам повторяющие импульсы тока нисходящей отрицательной молнии. В этой связи предполагают, что такие импульсы относятся к положительным нисходящим молниям, главная стадия которых развивается подобно главной стадии отрицательных молний. Единственное отличие состоит в том, что длительность импульса тока положительной молнии несколько больше, чем отрицательной [1.23].

Ко второму виду относятся импульсы тока, характеризующиеся значительно большими, по сравнению с отрицательными импульсами токов молнии, длительностями временных параметров и большими значениями переносимого заряда. Так, для данного вида грозовых разрядов положительной полярности, были зафиксированы длительности фронта импульса до 100 мкс, а длительности импульса до 1 мс. При этом, максимально измеренная величина переносимого положительной молнией заряда составляет около 300 Кл.

Разряд положительной молнии на землю обычно случается значительно реже, чем разряды отрицательных молний, однако, в

некоторых географических районах может оказаться больше разрядов положительных молний на землю. По оценке существующих стандартов, усреднённое количество разрядов положительных молний на землю составляет около 10% от общего количества. Разряды положительных молний на землю обычно начинаются с перемещения лидера в направлении вверх над горами и происходят значительно чаще, чем над ровной местностью. Обычно они состоят только из одного удара. Они имеют меньшую скорость нарастания, чем разряды отрицательных молний, но имеют большой пик тока и величину переносимого заряда. Их длительность больше, чем длительность одного удара отрицательной молнии, но обычно короче, чем полная продолжительность разряда отрицательной молнии. После удара молнии может наблюдаться «продолжающийся ток».

Пример тока в разряд положительной молнии показан на рис.1.48. Это усреднение данных нескольких ударов, хотя не учитывает «супермолний», которые случаются редко. Типичная продолжительность времени нарастания импульса положительной молнии составляет 20 мкс, а общая длительность равна 0,1 секунды. Хотя разряды положительных молний случаются значительно реже, чем разряды отрицательных молний, они тоже должны быть приняты во внимание при выборе конструкции ЛА и параметров испытаний.

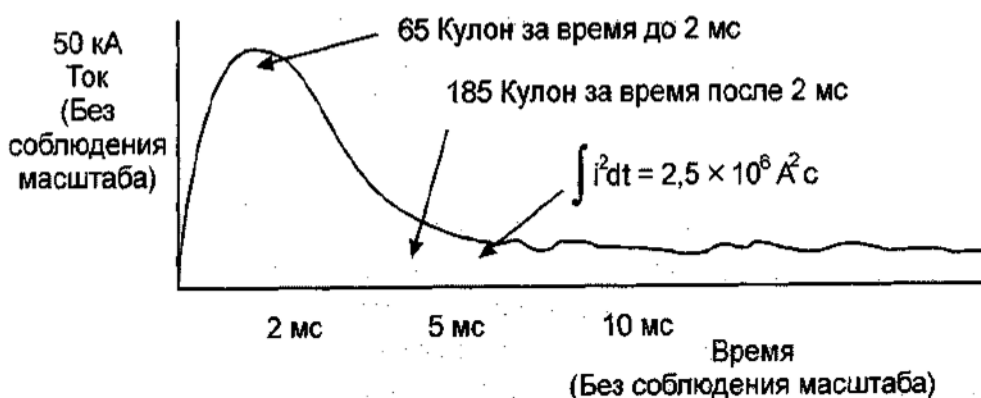


Рис. 1.48. - Модель формы сигналов тока среднестатистического разряда положительной молнии [1.12].

Положительная молния, как правило, однокомпонентная, но заряд переносимый ею значительно превосходит величину переносимого заряда многокомпонентной отрицательной молнией.

В табл. 1.5 приведены численные характеристики типичной положительной молнии.

Таблица 1.5 - Численные значения параметров тока положительной молнии [1.12]

Регистрируемый параметр	Минимальный	Характерный	Максимальный
Главная стадия			
Амплитуда тока, кА	4,6	35	250
Полный переносимый заряд, Кл	20	80	350
Переносимый заряд, за исключением непрерывного (сопровождающего) тока, Кл	2,0	16	150
Длительность фронта, мкс	3,5	22	200
Скорость нарастания тока, кА/мкс	0,2	2,4	32
Время полуспада импульса тока, мкс	25	230	2000

1.5.2 Облачные (внутриоблачные) разряды молни

Данный класс разрядов молнии включает в себя внутриоблачные разряды, разряды «облако-облако» и незавершенные разряды «облако-земля». Все эти разряды объединяет одно общее – практическое отсутствие у них явно выраженной главной стадии разряда молнии ввиду отсутствия избытков индуцированных в земле свободных зарядов.

На рис.1.17, изображающим типичное грозовое облако. объемная область положительных зарядов расположена в верхней части облака, а область отрицательных зарядов ближе к его основанию. Такое распределение зарядов типично почти для всех развитых грозовых облаков. Наблюдаются также дополнительные заряды отрицательной полярности под облаком, которые играют немаловажную роль при образовании разряда между облаком и землей. По мере того как активность грозового облака истощается, в облаке происходит перераспределение его основных зарядов.

По мере накопления зарядов в облаке электрическое напряжение в нем становится достаточным для формирования разряда. При этом может возникнуть искра, которая пробьет слой воздуха между ними и накоротко замкнет «генератор» зарядов внутри самого облака. В результате заряженные области полностью или частично нейтрализуют друг друга. Такие разряды молнии относят к классу облачных, хотя этот термин едва ли следует считать правильным.

Яркие каналы молнии обычно скрыты от нас массой дождевых капель, снега или частиц льда, находящихся в грозовом облаке. Если не считать случайных вспышек у границы облака, невооруженным глазом удастся увидеть только большое ярко освещенное пространство — рассеянное свечение облака, которое обычно называют плоской молнией.

Облачные разряды чаще всего бывают во время гроз, возникающих высоко над землей, что является опасным при эксплуатации летательных аппаратов. В таких условиях искре легче проскочить от нижней части заряженного облака к верхней или наоборот, чем пройти долгий путь от основания облака до земли. Облачные разряды нередко наблюдаются в засушливых районах на юге Африки — здесь основание облака выше над поверхностью земли, чем в районах с влажным климатом. В Англии (основание облаков лежит на высоте 1000 м) число разрядов внутриоблачных и между облаком и землей почти одинаково, тогда как на юге Африки эти величины относятся между собой как десять к одному. Если бы не это счастливое обстоятельство, частые грозы в Африке вызывали бы много пожаров и смертей [1.10].

Хотя исследования молнии облако — земля довольно многочисленны, о природе разрядов внутри облака, между облаками или между облаком и воздухом известно не так много. К тому же наблюдаются значительные расхождения в параметрах облачного разряда, полученных различными авторами.

Так как фиксировать токи облачных (межоблачных) разрядов практически не представляется возможным, то об их параметрах, в основном, судят по изменениям формируемых ими электромагнитных полей.

В то время как вспышки на землю характеризуются быстрыми компонентами изменения поля, происходящими каждые 50 мс и продолжающимися порядка 1 мс, облачные разряды приводят к медленным, относительно гладким изменениям поля. Как облачные

разряды, так и разряды облако — земля имеют примерно одинаковую продолжительность, обычно доли секунды. Качественные характеристики изменений поля, обусловленных облачными разрядами, впервые были рассмотрены Шонданом [1.10].

Вообще говоря, разряды молний в облаках обладают меньшей интенсивностью, чем разряды молний на землю, в особенности, в отношении пика тока, переноса заряда и интеграла действия. Однако, бортовые приборы показали некоторые доказательства того, что в некоторой части форм сигналов скорости нарастания импульсов в течение короткого времени (менее 0,4 мкс) могут быть выше, чем показано на фигурах, относящихся к разрядам молний с облаков на землю. Короткие импульсы малой амплитуды, но с высокими скоростями нарастания импульсов наблюдались во внутриоблачных разрядах молний. Подобные импульсы, благодаря перераспределению зарядов в облаке, наблюдаются между обратными ударами в разрядах молний на землю.

Для внутриоблачных разрядов были зарегистрирована сила тока до 60 кА, но более типичными являются токи силой от 20 до 30 кА [1.12].

Типичный внутриоблачный разряд молнии представлен на рис.1.49. Импульсы, наблюдающиеся во время фазы начального касания, могут также наблюдаться в разрядах отрицательных молний с облаков на землю.



Рис. 1.49 - Типичный внутриоблачный разряд молнии на самолёт [1.12]

Облачные молнии включают в себя обычно только лидерные стадии; их длина колеблется от 1 до 50 км. Доля внутриоблачных молний растёт по мере смещения к экватору, меняясь от 0,5 в умеренных широтах до 0,9 в экваториальной полосе. Прохождение молнии сопровождается изменениями электрических и магнитных полей и радиоизлучением, так называемыми атмосфериками, что важно при обеспечении требований электромагнитной совместимости оборудования летательных аппаратов.

Облачные разряды обычно происходят между центрами верхнего положительного и нижнего отрицательного зарядов. Общая продолжительность разряда порядка 0,5 с. В течение этого времени в облаке наблюдается слабая непрерывная светимость. Предполагают, что за этот период лидер преодолевает препятствие между двумя центрами зарядов. На непрерывную светимость накладывается ряд относительно ярких импульсов светимости, продолжительность которых составляет около 1 мс. На основании измерений электрических полей полагают, что импульсы светимости являются результатом относительно слабых возвратных ударов, возникающих при условии, когда распространяющийся лидер свяжет области противоположной полярности.

Общая величина заряда, который нейтрализуется при облачных разрядах, вероятно, порядка величины заряда, протекающего в разряде облако — земля. В связи с тем, что облачные разряды не имеют главной стадии разряда, они состоят исключительно из лидерной стадии. В среднем число таких разрядов колеблется от 4 до 20 за период времени 500 мс. Амплитуда токовых импульсов при этом не превышает 10 кА. Также было установлено, что переносимый заряд для внутриоблачных (межоблачных) разрядов изменяется в пределах от 0,3 до 100 Кл. Среднее расстояние между зарядами по вертикали составляет 0,6 км, причем положительный заряд находится выше отрицательного [1.23].

В процессе разряда в облачных молниях выделяют три составные части (см. рис. 2.30): начальную часть (1), очень активную часть (2) и часть слабых возвратных ударов (3).

Наблюдениями установлено [1.2, 1.24], что в среднем около 50% облачных разрядов содержат все три ранее указанные части, 40% состояли из очень активной части и части слабых разрядов, у оставшихся 10% отсутствовала часть слабых разрядов и разряды

состояли либо из начальной, либо из очень активной ее части, либо из обеих.

В табл. 1.6 приведены численные характеристики токов типичных разрядов облачных молний [1.4].

Таблица 1.6 - Численные значения параметров тока облачной молнии [1.4].

Регистрируемый параметр	Минимальный	Характерный	Максимальный
Амплитуда тока, кА	1	4	10
Полный переносимый заряд, Кл	0,3	50	100
Общая длительность разряда, с	0,27	0,45	1,0
Число единичных импульсов	4	6	20
Интервал между импульсами, мкс	300	680	1200
Длительность начальной части, мс	50	300	600
Длительность очень активной части, мс	200	100	500
Длительность слабых возвратных ударов, мс	20	50	200
Период повторения импульсов, мкс	10	25	50
Длительность фронта единичного импульса, мкс	0,1	0,2	0,5
Время полуспада импульса тока единичного импульса, мкс	20	30	50

1.5.3 Горизонтальные молнии

В засушливых районах грозовой разряд, выходя из основания облака, часто разветвляется в воздухе и не достигает земли. Такая молния далеко не всегда направлена вертикально вниз. Напротив, нередко она движется почти горизонтально под облаком и оканчивается либо в воздухе, либо в другой части облака, как правило на расстоянии от 10 км до 150 км от места появления. В последнем случае молния, зародившаяся в области отрицательных зарядов, устремляется к области положительных зарядов, которые опустились вместе с дождем из верхней части облака или возникли

в результате определенных процессов. Иногда блуждающие молнии движутся к земле и ударяют в нее за много километров от места своего образования. Этот вид грозового разряда в воздухе, редко наблюдаемый, но, вероятно, достаточно распространенный, имеет вид сияния, поднимающегося от вершины облака вверх.

Эта молния не бьет непосредственно в землю непосредственно под или вблизи грозовых облаков, она распространяется в горизонтальной плоскости по небу. Иногда такая молния может распространяться по чистому небу, исходя от одной грозовой тучи на расстояния 20 – 150 км. Такие молнии очень мощные и очень опасные. Поэтому их называют «громом среди ясного неба» так как их возникновение в области их появления не сопровождается типичными для грозовой деятельности процессами (наличие кучевых грозовых облаков и грозовых фронтов), поэтому особую опасность горизонтальные молнии представляют для летательных аппаратов.

Сверкающие молнии в грозовом небе вполне привычное для всех явление. Помимо привычных для нас вспышек, бьющих снизу-вверх или сверху вниз, разряды в большем своем количестве около 85-90 % происходят внутри облака или между облаками. При этом, горизонтальные молнии из общего числа облачных разрядов случаются довольно редко до 2-5% от общего количества облачных разрядов.

Опасность горизонтальных молний кроется, с одной стороны, в их достаточно большой протяженности. Такие молнии способны распространяться на значительные расстояния, до тех пор, пока отрицательно заряженная туча не встретит положительно заряженную или земную поверхность, например, гору. Так, согласно данным Всемирной метеорологической организации протяженность самой длинной горизонтальной молнии, которая была зафиксирована 31 октября 2018 года составила 709 ± 8 км: от Атлантического океана через районы южной Бразилии и до территории Аргентины. Спутниковый снимок этой молнии представлен на рисунке 1.50.

Рекорд наибольшей продолжительности одной вспышки молнии составляет 16,73 секунды и был зафиксирован над северной Аргентиной 4 марта 2019 года. Спутниковый снимок представлен на рисунке 1.51.

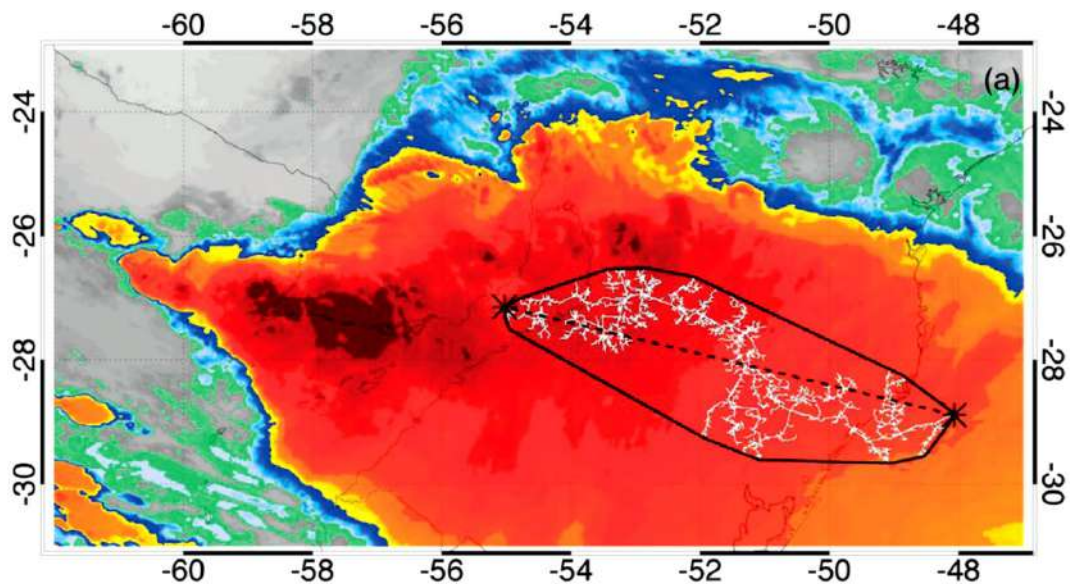


Рис. 1.50 - Спутниковый снимок самой длинной молнии, Бразилия, 31 октября 2018 года
 [<https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-certifies-megaflash-lightning-extremes>]

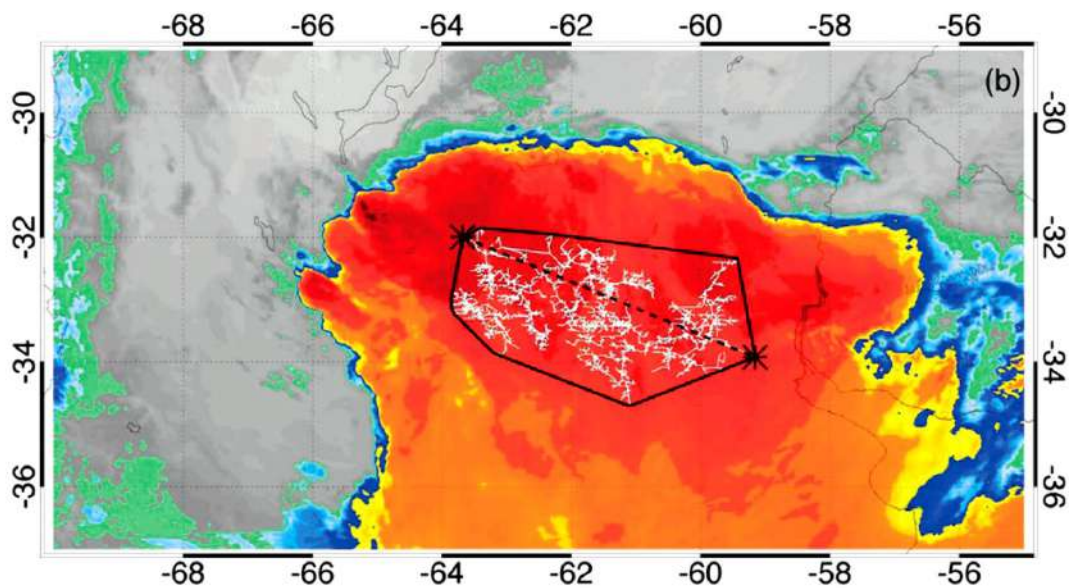


Рис. 1.51 - Спутниковый снимок самой продолжительной вспышки молнии, Аргентина, 4 марта 2019 года
 [<https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-certifies-megaflash-lightning-extremes>]

В этой связи горизонтальный разряд молнии вполне может нанести прямой удар по летящему в небе самолету. Также необходимо учитывать, что траектория прохождения молнии сопровождается изменениями электрических и магнитных полей. Электромагнитные помехи от токов такой молнии являются самым опасным видом воздействия на электрические цепи, авионику и приборы самолетов.

В настоящее время, в связи всеобщим потеплением, горизонтальные молнии стали встречаться гораздо чаще, чем прежде. Кроме того, центры образования этих молний в облаках поднимаются выше, чем прежде. Скорее всего это связано с тем, что с ростом температуры у поверхности земли увеличивается длина свободного пробега и энергия электронов на поверхности. Возможно, что повышенная электризация в грозовых облаках также связана с усилившейся бомбардировкой атмосферы высокоэнергетическими частицами из солнечного ветра, создающих треки в грозовых облаках, и повышению потенциала на некоторых участках земной поверхности из-за деятельности человека - применения в системах распределения электрической энергии системы заземления с глухозаземленной нейтралью трансформаторов. Поскольку распределение дополнительной энергии и отрицательного потенциала по поверхности земли не имеет определенной закономерности, та же последовательность распределения отражается и в облаках, а при большой разности потенциалов в облаках возникают горизонтальные напряжения и горизонтальные разряды

Процессы, определяющие точки "начала" и "конца" горизонтальной молнии также, как и их электромагнитные параметры до конца не изучены, с увеличением энергии запасенной в облаке и разностей потенциалов в нем, а также между землей и загадочной точкой (точками их бывает несколько, кроме того возможно образование повторных индуцированных центров аккумуляции зарядов) "начала" разряда в облаке, при этом мощность в канале молнии возрастает.

Создание всемирной сети локации молний и измерения их параметров существенно повысит достоверность данных. Некоторые элементы систем мониторинга рассмотрены далее в главе 3.

1.6 О природе шаровой молнии

В рамках этого подраздела авторы не ставят целью дать полную картину имеющихся теорий физической природы шаровой молнии. К тому же, ни одна из этих теорий пока не нашла экспериментального подтверждения. Те, кому захочется детально ознакомиться с этим вопросом, для начала могут обратиться к увлекательной работе И.П. Стаханова [1.18], а также к другим источникам, например, [1.19, 1.20]. Следует отметить, что к информации из интернета нужно относиться с осторожностью, поскольку, под видом шаровой молнии представляют описание и иллюстрации разнообразных светящихся объектов. Обилие гипотез объясняется неординарным поведением объекта изучения.

Остановимся лишь на одной гипотезе [1.20], которая авторам представляется весьма правдоподобной и понятной. Далее приведен текст из этой работы с некоторыми изменениями и комментариями.

Представление о форме шаровой молнии как о шаре сформировалось на основе сообщений встревоженных очевидцев, встречавшихся с шаровой молнией. Такое же общее представление, вероятно, осталось бы, если бы наблюдались яркие образования в виде тороида, особенно если его ось ещё и прецессировала. Рассмотрена возможность существования кольцевого образования («кольцевой молнии») по внешнему виду напоминающего шаровую молнию. Сначала напомним несколько аналогичных явлений.

Например, в металлическом кольце диаметром $2R=10$ см из медного провода диаметром $2r=5$ мм с индуктивностью $L = \mu_0 R \cdot \ln(8R / r - 7 / 4) = 0,2$ мкГн и активным сопротивлением $R_{\text{акт}} = 1,1$ мкОм индуцированный ток после снятия возбуждающей силы продолжает циркулировать ещё доли секунды, спадая по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = L / R_{\text{акт}} = 0,2$ с. Ток поддерживается за счёт энергии, созданного им же магнитного поля. Если проводник сделать сверхпроводящим, то ток и энергия будут существовать долго. Виток можно перенести в любую точку пространства, вместе с ним будет перенесено его магнитное поле. Энергия магнитного поля будет теперь находиться в новых точках пространства. Подобным образом переносится энергия электрического поля вместе с электрическими зарядами (например, заряженный конденсатор) или механическая энергия вращающегося

волчка при переносе его (вместе с подставкой без остановки волчка) в новую область пространства.

Другой пример. Электронные кольца ускорителя типа «смокотрон» (*smoke* – курить, пускать колечки). Условное название ускорителя, в котором ускоряются как единое целое не группы частиц, а предварительно сформированные вращающиеся кольца электронов. По-видимому, могут быть устойчивыми плазменные кольца вольтовой дуги (например, в ТОКАМАКе).

Рассмотрим три пути оценки возможности образования плазменных колец (рис. 1.50):

- 1) взаимоиנדукция прямого провода и кольца;
- 2) взаимоиנדукция двух колец;
- 3) самоиנדукция.

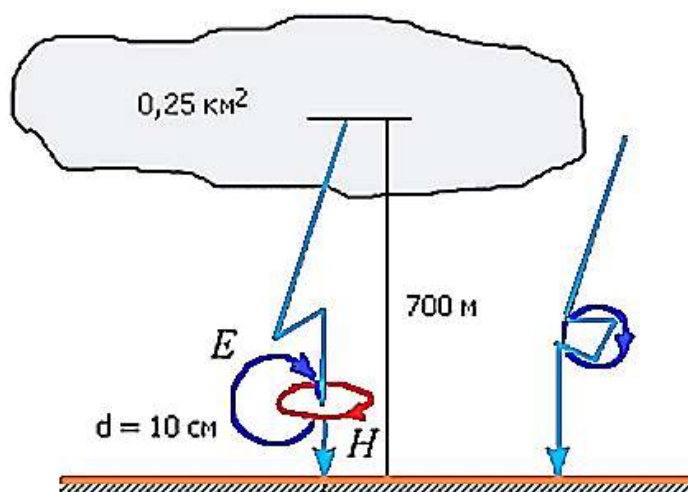


Рис. 1.52 - Пути возможного образования плазменных колец

Если принять, что источником энергии образования кольцевых молний является линейная молния, то облако площадью $S = (0,5 \cdot 0,5 \text{ км}) = 0,25 \text{ км}^2$, находящееся на высоте $h = 700 \text{ м}$, имеет электрическую ёмкость относительно земли $C = \epsilon_0 S / h = (4...5) \cdot 10^3 \text{ пФ}$. Индуктивность шнура тока при $0,5 \text{ мкГн/м}$ составит около 350 мкГн , волновое сопротивление контура $CLR_{зк} \rho = \sqrt{L / C} = 280 \text{ Ом}$. Сопротивление заземления $R_{зк}$ в одной точке земли составит примерно 100 Ом [1.25]. Следовательно, процесс разряда имеет слабо колебательный характер (одно – два колебания с периодом $T = 8 \text{ мкс}$). По справочным данным [1.26], ток молнии составляет $50...200 \text{ кА}$ и скорость его изменения равна

50 кА/с. При токе 100 кА потенциал облака должен составлять $100\text{кА} \cdot 280\text{ Ом} \approx 30\text{ МВ}$. Оценим энергию разряда выбранного варианта линейной молнии: $W = CU^2 / 2 = 2\text{ МДж}$. Примерно такая энергия высвобождается при взрыве 500 г тринитротолуола. Такого количества энергии достаточно чтобы вскипятить около 6 литров воды.

В процессе разряда энергия электрического поля облака переходит в другие виды: энергию магнитного поля вокруг шнура тока, тепловую энергию разогрева канала молнии, электромагнитное поле, излучаемое в окружающее пространство.

Вокруг шнура тока возникает магнитное поле, силовые линии которого – кольца – образуют цилиндры с центром на оси тока. Индукция поля убывает обратно пропорционально расстоянию от оси тока: $B = \mu_0 I / 2\pi r$. Упрощённо можно представить тороидальный магнитопровод надетый на шнур тока (также как измерительный трансформатор тока).

Электродвижущая сила витка тороида диаметром 10 см составит $E = d\Phi / dt = 3,8\text{ кВ}$, средняя напряжённость электрического поля вдоль витка будет равна 12 кВ/м.

В этом решении не учтено неравномерное распределение электрического поля в зависимости от расстояния от оси тока. Строгое решение системы дифференциальных уравнений для частных производных электрического поля для линейного тока рассмотрено далее. Выражение ротора вектора \mathbf{E} в цилиндрических координатах, с учетом осевой симметрии независимости от координаты z имеет вид [1.20]:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \text{rot}_\alpha \mathbf{E} = -\frac{\partial E_z}{\partial r} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{найдем} \quad E_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\partial I}{\partial t} \ln \frac{r}{r_0},$$

где r_0 радиус цилиндрической поверхности, на которой напряжённость электрического поля равна нулю.

Напряжённость электрического поля вблизи от оси тока составляет примерно 60 кВ/м. Вычисление циркуляции вектора напряжённости электрического поля вдоль контура 10 см даёт несколько большее значение за счёт учёта зон с сильным полем вблизи оси тока – 5,3 кВ (вместо 3,8 кВ).

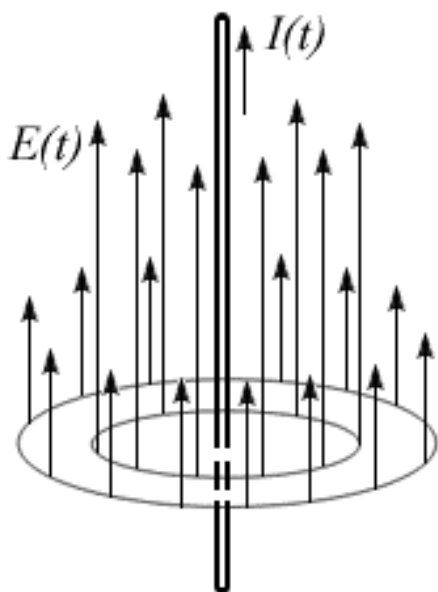


Рис. 1.53 - Картина силовых линий электрического поля линейного, изменяющегося во времени тока

Учитывая, что электрическая прочность сухого воздуха составляет около 500 кВ/м, то для устойчивого кольцевого разряда напряжённость поля должна быть на порядок больше.

Если шнур молнии делает извилину (рис. 1.52), то связь с воображаемым контуром становится сильнее ($M = 0,07$ мкГ).

Значение ЭДС взаимной индукции при этом составит $u = M(dI/dt) = 6,7$ кВ, что в 3 раза больше значения ЭДС самоиндукции контура – $u = 20$ кВ ($L = 0,2$ мкГн). При спаде тока может возникнуть пробой, который замыкает контур тока.

Во всех вариантах напряжение в контуре, недостаточно для пробоя сухого воздуха. Если в расчётах взять не значение тока 100 кА, а максимальное – 200 кА, учесть влияние влажности воздуха, а также подсветку ультрафиолетовым светом линейной молнии, то возможность возникновения кольцевого разряда становится реальной. Вероятно, необходимостью этих дополнительных условий объясняются редкое появление «шаровых молний».

После возникновения разряда образуется замкнутый сам на себя шнур «вольтовой дуги». При этом отсутствуют как катодная, так и анодная части шнура дугового разряда – части большого падения напряжения (большого сопротивления), области рассеивания большой мощности. Остаётся, лишь, средняя «холодная часть» шнура вольтовой дуги с малыми потерями мощности.

При токе разряда 100...200 кА активное сопротивление шнура может быть в несколько раз меньше сопротивления медного проводника и тогда время существования кольцевого образования будет долгим. Ток постепенно будет спадать и при токе в несколько десятков ампер (минимальный ток существования дугового разряда) кольцевая молния исчезнет.

Начальная энергия кольца с током 100 кА составляет $W = LI^2/2 = 1000$ Дж, то есть равна энергии конденсатора ёмкостью 2 мкФ, заряженного до напряжения 30 кВ.

Такое представление о механизме образования шаровых молний оправдывает ряд известных её качеств: молния шипит как вольтова дуга, молния свободно перемещается в воздушном пространстве, ибо проводник тока состоит из нагретого ионизированного воздуха. Сомнительна возможность проникновения молнии сквозь препятствия, хотя большинство строительных материалов не оказывают препятствий для проникновения магнитного поля – носителя энергии «шаровой молнии».

Исходя из вышеизложенного, опыты для лабораторного исследования «шаровых» молний должны производиться на мощных испытательных установках, чтобы организовать дуговой газовый разряд достаточной силы. Особенно важно изучение газового разряда в индукционном электрическом поле при нормальном атмосферном давлении.

В пользу этой модели можно отметить факторы, влияющие на возможность появления шаровой молнии по описанному процессу:

- возникновение молний с силой тока до 350 кА;
- зигзагообразный путь развития лидера молнии;
- высокая проводимость ионизированного воздуха в канале молнии, способная обеспечивать протекание кольцевых токов заметное (до минут) время;
- возможность отрыва фрагмента канала молнии при резком изменении траектории, с переходом в замкнутую кольцевую форму;
- изменение траектории движения кольцевого тока в результате взаимодействия с магнитным полем Земли.

Трудность моделирования заключается в том, что на имеющихся высоковольтных установках не возможно обеспечить получение сильных токов (до 200 кА) в длинных (десятки метров) воздушных промежутках. При этом, обеспечение резкого изменения траектории лидера, когда может произойти отрыв части канала, тоже весьма проблематично, но, потенциально, реализуемо, например, с использованием триггерных молний.

Литература к главе 1

- 1.1. Cooray V. An Introduction to Lightning / Springer Dordrecht Heidelberg New York London.-2015.- 391 p.
- 1.2. Uman M. The lightning discharge. Academic, London.-1987.-391p.
- 1.3. Мареев Е.А., Трахтенгерц В.И. Загадки атмосферного электричества / Природа – 2007. - № 3 – с 1-8.
- 1.4. Lightning like never before. Annual Lightning Report 2020. VISALA.- 2021.-15 p. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-Annual-Lightning-Report-2020-B212260EN-A.pdf>.
- 1.5. IEC 62858:2019 Ed.2 Lightning density based on lightning location systems (LLS) - General Principles.-15p.
- 1.6. Вебсайт НАСА https://lightning.nsstc.nasa.gov/lightning_info.html
- 1.7. Карта грозовой активности в Украине. <https://enext.ua/uk/press/articles/Molniezashchita-что-novogo/>
- 1.8. IEC 62305-2:2010 Part 2. Protection again Lightning. Risk Management.- / IEC, Geneva, Switzerland. -88 p.
- 1.9. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество: Пер. с англ.-Л.: Гидрометеиздат, 1974. -418с.
- 1.10. Шонланд Б. Полет молнии: Пер. с англ. Н.М. Имянитова. - М.: Гидрометеиздат, 1970. -160с.
- 1.11. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. -350с.
- 1.12. SAE ARP 5412A:2005. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms.-56 p.
- 1.13. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем. / И.П.Кужекина; Под ред. Б.К.Максимова.- М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 1.14. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1979. - 327с.
- 1.15. Ядерный взрыв в космосе, на земле и под землей. (Электромагнитный импульс ядерного взрыва). Сб. статей. Пер. с англ. О. Петренко под ред. С. Давыдова. М.: Воениздат, 1974. - 235 с.
- 1.16. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292с.
- 1.17. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. – М.: Мир, 1983.– 288 с.
- 1.18. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1985.-208 с.
- 1.19. Белый В. Шаровая молния – схема устройства, причина устойчивости. Интернет ресурс: <http://n-t.ru/tp/mr/smb.htm>.
- 1.20. Черкашин Ю. Шаровая молния создана кольцевым током. Интернет ресурс: <http://n-t.ru/tp/ng/sm9.htm>

- 1.21. IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 1: General principles / IEC, Geneva, Switzerland, 2010. – 72 p.
- 1.22. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. - М.: Радио и связь, 1991. - 264 с.
- 1.23. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащита / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер // . – М.: Физматлит, 2001, - 320 с.
- 1.24. Александров М.С. Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ / М.С. Александров, З.М. Бекленева, Н.Д.Гладштейн и др.// - М.: Наука, 1972. -196 с.
- 1.25. Электротехнический справочник. Под ред. М.Г. Чиликина. М: Госэнергиздат, 1952.
- 1.26. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Lightning Electromagnetics // Working Group C4.40 August 2013 – 118 p.

Глава 2. ГРОЗОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ПОРАЖАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ВЛИЯНИЯ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

2.1 Грозовая электромагнитная обстановка

2.1.1 Основные составляющие грозовой электромагнитной обстановки

Грозовые процессы сопровождаются концентрацией, перемещением в пространстве и изменением во времени значительных электрических зарядов. В этой связи разряды молнии являются источниками мощных (сильных) электрических, магнитных и электромагнитных полей, больших токов и высоких напряжений.

Совокупность в заданной области пространства грозовых электромагнитных явлений определяет *грозовую электромагнитную обстановку (ГЭМО)* [2.1, 2.2].

Параметры ГЭМО, как показано в [2.2], зависят от:

- вида грозового разряда (наземный или облачный);
- полярности грозового разряда (отрицательная или положительная);
- среды формирования (воздушная или проводящая) и ее электрофизических характеристик;
- амплитудно-временных параметров тока в канале молнии;
- расстояний до места разряда и линейных размеров канала молнии.

В [2.1 – 2.5] показано, что наиболее опасными видами грозовых разрядов с точки зрения их поражающего электромагнитного воздействия и дестабилизирующего влияния на летательные аппараты (ЛА) являются разряды нисходящей или восходящей наземных линейных молний отрицательной и положительной полярности, облачные (межоблачные) разряды, горизонтальные молнии.

В этой связи особый интерес представляет формируемая этими видами молний ГЭМО. Процесс формирования ГЭМО начинается на стадии разделения электрических зарядов и образования грозовых облаков, которые создают в окружающем пространстве квазистационарные электрические поля и формируют ГЭМО, определенную в [2.1, 2.2] как электростатическую или ГЭМО предгрозового периода.

ГЭМО предгрозового периода в основном определяется электростатическим полем кучевых грозовых облаков, которое приводит к возникновению коронного разряда (огней святого Эльма).

Развитие непосредственно разряда молнии связано с перемещением в пространстве значительных электрических зарядов, что приводит к существенному изменению характеристик ГЭМО предгрозового периода. Если учесть, что в процессе своего формирования и развития линейная молния проходит три стадии: *лидерную, главную и финальную*, то создаваемые молнией в окружающем пространстве электромагнитные поля так же будут соответствовать этим трем стадиям, поочередно сменяющим друг друга [2.2].

При этом электрические и магнитные поля, присущие лидерной стадии молнии в виду их относительно малой скорости изменения во времени, связанной с проращиванием лидера к земле или от земли, в своей основной части будут формировать квазистатическую предразрядную ГЭМО [2.2].

Особый интерес в этом аспекте представляют ступенчатые лидеры, которые в процессе своего проращивания к земле, помимо квазистатических предразрядных электрических полей, формируют в окружающем пространстве пульсирующие электрические и магнитные поля в виде серии отдельных коротких импульсов, равномерно распределенных в течении всей лидерной стадии с большой скважностью и мало изменяющейся амплитудой, близко схожих с пульсирующими полями облачных разрядов [2.6]. Пульсирующая ГЭМО наиболее неблагоприятна для систем дискретной передачи информации, так как частота следования импульсов помех и их параметры совпадает с характеристикой импульсов, используемых в этих системах [2.7].

Наибольшее неблагоприятное электромагнитное влияние оказывает электродинамическая ГЭМО, формируемая молнией в период главной стадии разряда, которая характеризуется наличием высокоинтенсивных и быстро изменяющихся во времени электрических и магнитных полей [2.1, 2.2].

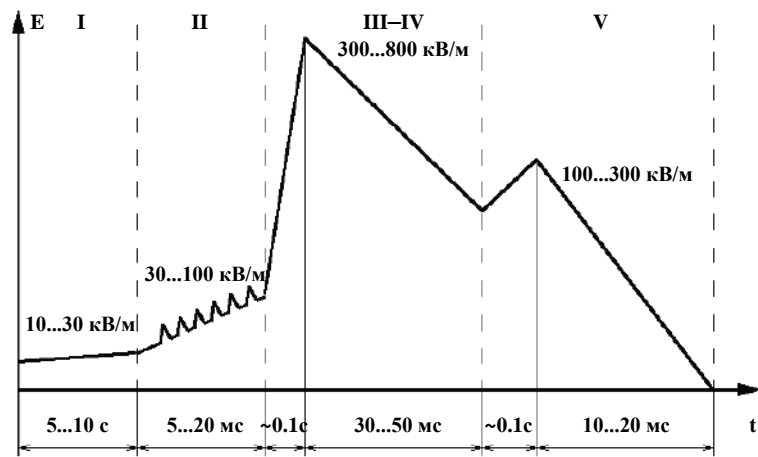
При этом номенклатура внешних воздействующих факторов электромагнитного поля (ВВФ ЭМП) [2.8], соответствующая главной и финальной стадиям разряда молнии дополняется большими импульсными токами и высокими напряжениями.

На рис. 2.1 представлены качественные графические зависимости изменения во времени ВВФ ЭМП, формируемого разрядом молнии «облако-земля» отрицательной полярности в ближней зоне и базовые значения их усредненных амплитудных значений.

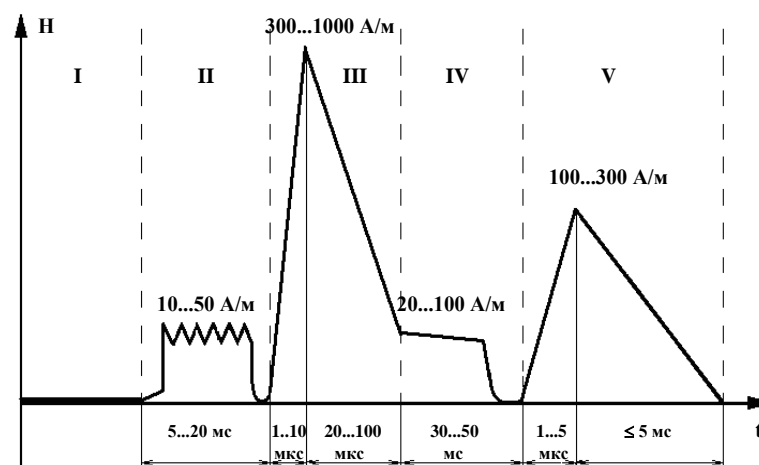
Грозовые облака в предгрозовой период создают у поверхности земли электростатические поля со средним уровнем напряженности от 10 до 30 кВ/м, значение которого возрастает по мере приближения к грозовому облаку до 50...60 кВ/м [2.2, 2.9, 2.10].

Лидерная стадия характеризуется относительно медленным увеличением напряженности электрического поля непосредственно под лидером до 100 кВ/м за время 5...20 мс по мере его приближения к объекту поражения. Затем, с расстояния приблизительно 100 м происходит быстрый рост (за 0,1 мс) напряженности электрического поля до 300...400 кВ/м [2.2, 2.3, 2.11], после чего начинается более медленное изменение напряженности поля до начала повторного разряда [2.2, 2.12]. В виду ступенчатого характера прорастания лидера в этот период на фоне медленного увеличения напряженности электрического поля наблюдаются серии коротких импульсов с большой скважностью 10...100 мкс и мало изменяющейся амплитудой (пульсирующее электрическое и магнитное поле). Средняя длительность лидерной стадии составляет 1...10 мс, общая длительность помехи от одиночной лидерной стадии распределена равномерно в пределах 1...4 мс [2.6].

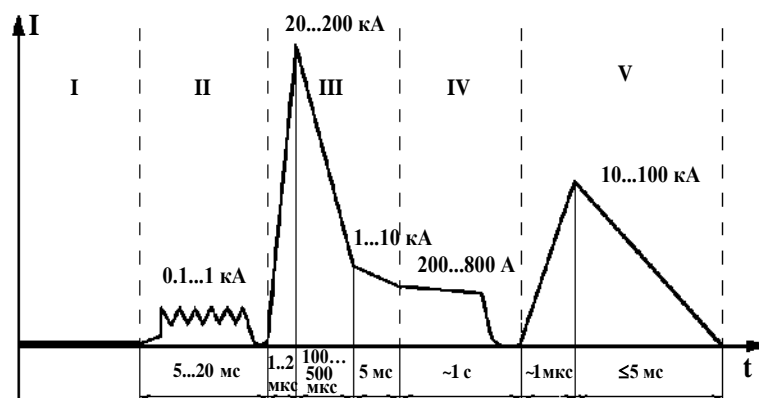
Формирование магнитной составляющей ГЭМО непосредственно связано с токами лидерной стадии, главной стадии разряда и стадии послесвечения.



Напряженность электрического поля



Напряженность магнитного поля



Ток в канале разряда молнии

Рис. 2.1 - Качественные графические зависимости изменения во времени основных ВВФ ЭМП нисходящей отрицательной молнии (I - предгрозовой период; II - лидерная стадия; III - главная стадия; IV - финальная стадия; V - повторный разряд).

На лидерной стадии разряда молнии происходит незначительное, по сравнению с главной стадией, увеличение тока за счет стекания зарядов в канал лидера. На этом фоне ярко выражены импульсы тока отдельных ступеней длительностью 3...10 мкс, имеющих амплитуду 0,1...1 кА и появляющиеся в течение периода 5...20 мс со скважностью от 10 до 100 мкс [2.3]. Этим же значениям временных параметров соответствуют импульсы излучения напряженности магнитного поля лидерной стадии молнии [2.6].

Главная стадия молнии характеризуется резкими изменениями в канале тока обратного разряда, который в среднем за 1...2 мкс увеличивается до значения (20...200) кА и затем в течении 100...500 мкс убывает до значения 1...2 кА, после чего по каналу течет сопровождающий ток с амплитудой 200...800 А в течении 30...50 мс. Повторный разряд, как правило, характеризуется меньшими по значению амплитудными и временными параметрами [2.2, 2.9].

Примерно такой же временной характер изменения имеет напряженность магнитного поля, создаваемого грозовыми разрядами [2.2].

Масштабы и характер поражающего воздействия и дестабилизирующего влияния ВВФ ЭМП грозовых разрядов на ЛА в основном зависит как от параметров ГЭМО, так и характеристик их восприимчивости к грозовым воздействиям. Поэтому в аспектах исследований ВВФ ЭМП грозовых разрядов главной задачей является анализ структуры ГЭМО и выявление тех ее компонент, параметры которых оказывают наиболее неблагоприятное влияние на ЛА или приводят к выходу из строя их элементной базы.

2.1.2 Параметры тока нисходящей молнии облако-земля

2.1.2.1 Параметры тока нисходящей молнии отрицательной полярности

Из всей номенклатуры ВВФ ЭМП, составляющих основу и определяющих ГЭМО, параметры ***токов нисходящей молнии отрицательной полярности*** изучены и определены наиболее полно и достоверно.

Ток в канале такой молнии представляет собой импульс с быстрым нарастанием от нуля до максимума (фронт волны) и сравнительно медленным уменьшением (спад волны) (рис. 2.2).

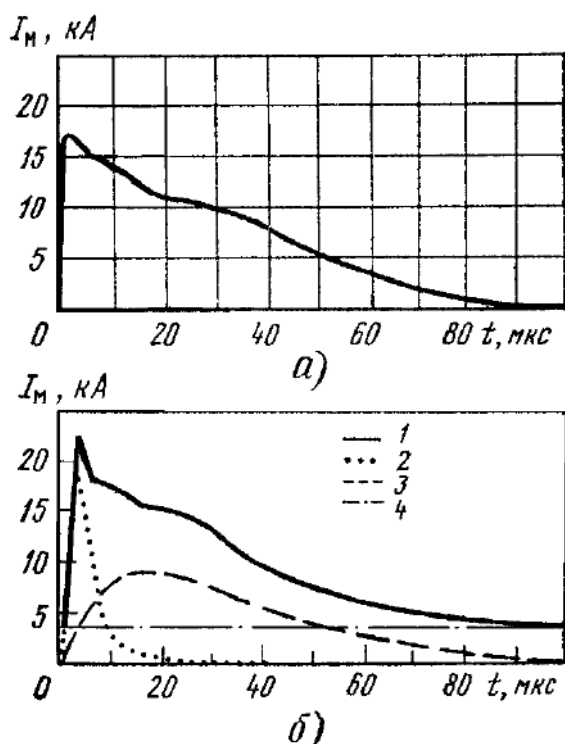


Рис. 2.2 – Ток в канале разряда главной стадии нисходящей молнии отрицательной полярности [2.2]

а - типичная осциллограмма;
б - составляющие импульса тока:

- 1 - полный ток молнии,
- 2 - импульсный ток;
- 3 - ток короны;
- 4 - сопровождающий ток.

молнии позволили с достаточной степенью точности определить основные значения этих параметров.

Ток молнии в канале изменяется в широких пределах от нескольких тысяч ампер до сотен тысяч ампер. Молнии с большими токами возникают крайне редко. Так молнии с токами в 200 кА возникают в 0.7...1.0 % случаев от общего числа наблюдаемых разрядов. Число случаев молнии с величиной тока в 30 кА составляет порядка 50% [2.3, 2.9, 2.13].

При расчетах грозозащиты для амплитудных значений тока молнии используют кривые, ход которых соответствует

Численно импульс тока молнии определяется через его амплитудные параметры и временные характеристики: амплитуду тока молнии - I_m , среднюю крутизну фронта импульса тока молнии - $I'_m = (di_m(t)/dt)$, длительность фронта импульса - τ_ϕ и длительность полуспада импульса - τ_u . При этом, довольно часто можно встретить относительную характеристику волны тока молнии как отношение длительности фронта к длительности полуспада импульса - (τ_ϕ / τ_u) .

Результаты многолетних наблюдений [2.3, 2.9, 2.13 - 2.16], основанных на прямых и косвенных измерениях основных параметров токов

экспоненциальному закону распределения вероятностей [2.3, 2.9, 2.14]:

$$P(I_M \geq I_{Mp}) \approx \exp(-0,04I_{Mp}) \quad (2.1)$$

где I_M - максимальное значение тока молнии, кА; P - вероятность того, что максимальный ток молнии больше I_{Mp} ; I_{Mp} - расчетная амплитуда тока молнии, кА.

Амплитуда тока молнии в канале разряда имеет тенденцию к уменьшению с ростом удельного электрического сопротивления земли в месте удара молнии. В диапазоне изменения ρ_z - (200 – 1100) Ом/м изменение амплитуд токов молнии происходит приблизительно по закону квадратичной гиперболы, и при больших ρ_z они стремятся к постоянной величине:

$$I_m = 16 + 2 \cdot 10^6 / \rho_z, \text{ кА} \quad (2.2)$$

Крутизна тока молнии на фронте также как и ее амплитуда носит вероятностный характер и изменяется в широких пределах. Данный параметр тока молнии важен, так как он объединяет в себе амплитудные и временные характеристики.

Кривая вероятности крутизны тока молнии на фронте, также близка к экспоненциальному закону изменения. При этом наиболее широкое распространение получила эмпирическая формула

$$P(I'_M \geq I'_{Mp}) \approx \exp(-0,08I'_{Mp}) \quad (2.3)$$

где I'_M - крутизна тока молнии на фронте, кА/мкс; I'_{Mp} - расчетная крутизна тока молнии на фронте, кА/мкс.

Немногочисленные одновременные результаты регистрации амплитуд токов молнии и их крутизны показывают, что крутизна имеет тенденцию возрастать при увеличении амплитуды тока молнии, однако эта тенденция выражена довольно слабо. В расчетах эти величины, в первом приближении, принимают независимыми.

Вероятность молнии с параметрами $I'_M \geq I'_{Mp}$ определяется как произведение вероятностей

$$P(I_M \geq I_{Mp}; I'_M \geq I'_{Mp}) \approx \exp[-(0,04I_{Mp} + 0,08I'_{Mp})] \quad (2.4)$$

Иногда принимают жесткую связь, причем обычно принимают $\tau_{\phi} = 2 \text{ мкс} = \text{const}$.

При этом:

$$P(I_M \geq I_{Mp}; I'_M \geq I'_{Mp}) = P(I_M \geq I_{Mp}) \quad (2.5)$$

Долгое время считалось, что молния - это явление в основном низкочастотное [2.6, 2.12], однако, на основании проведенных измерений в [2.17] было показано, что при взаимодействии, в частности молнии и самолета имеет место значительная энергия, относящаяся к высоким частотам. Последующие измерения параметров молнии [2.18 - 2.20] подтвердили наличие высокочастотных составляющих в спектре тока молнии. В основном высокочастотная часть спектра тока молнии зависит от скорости изменения тока на фронте, где помимо микросекундных длительностей в начальной части фронта импульса тока молнии, приблизительно на 1/3 ее длительности, присутствует наносекундная часть [2.19].

Данные о параметрах тока молнии, приведенные в [2.21], показывают, что в 10% случаев крутизна тока превышает 120 кА/мкс, а в 5% - время нарастания тока молнии менее 200 нс. Информация о более высоких значениях для крутизны тока приведена в [2.21, 2.22]. Так, в [2.21] имеются сведения о максимальных значениях крутизны тока достигающих $(3,8 - 6,8) \cdot 10^{11}$ А/с.

Длительность фронта импульса тока нисходящей отрицательной молнии при ударе в землю колеблется в пределах от 0,5 до 10 мкс. В 50% случаев время достижения максимального значения силы тока первого разряда оценивается 5,5 мкс [2.5].

Встречются сведения о существенно более коротких фронтах тока молнии. В [2.23, 2.24] опубликованы результаты измерений времени нарастания тока молнии порядка 200 нс (данные получены для параметров повторного разряда). В [2.25] для стадии главного разряда были получены значения около 90 нс. Минимальное значение длительности фронта импульса грозового разряда приведены в [2.23], которые соответствуют 30 нс.

Длительность полуспада импульса тока молнии в основном определяется временем распространения обратного разряда от земли к облаку и в связи с этим изменяется в пределах от 20 до 80 -

100 мкс. Средняя длительность полуспада тока молнии близка к 75 мкс [2.5].

Таким образом, первый импульс тока отрицательной молнии, соответствующий вероятности появления 50% имеет следующие параметры [2.5, 2.13]:

- амплитудное значение – 30 кА;
- длительность фронта импульса – 5 мкс;
- длительность полуспада импульса – 75 мкс.

Помимо приведенных выше параметров тока молнии нормируется еще один параметр, непосредственно влияющий на формирование амплитудно-временных характеристик тока в канале разряда молнии - *заряд переносимый молнией*. Его численные значения колеблются в пределах от долей кулона до нескольких десятков кулон.

Средний заряд, опускаемый в землю многократной молнией равен 15 – 25 Кл. Учитывая, что в среднем разряд молнии содержит три компоненты, следовательно во время одной компоненты в землю переносится около 5 – 8 Кл. Из них в канал лидера стекает около 60 % всего данного скопления зарядов, что составляет 3–5 Кл. Удар молнии в равнинные участки поверхности земли несет заряд 10 – 50 Кл (в среднем 25 Кл), при ударах молнии в горах ее численное значение заряда колеблется в пределах от 30 до 100 Кл (в среднем 60 Кл), при разрядах в телевизионные башни стекает заряд до 160 Кл.

Как показывает анализ литературных источников, посвященных теоретическим исследованиям ЭМО, создаваемой грозowymi разрядами [2.26, 2.27], правильный выбор вида аппроксимации формы волны тока молнии в канале разряда является одним из основных показателей корректности математической модели и достоверности получаемых в процессе расчетов результатов. Аппроксимация тока в канале молнии возможна с использованием самых разнообразных аналитических выражений.

В табл. 2.1 приведены наиболее употребляемые на практике их виды с информацией присущих тем или иным видам аппроксимаций преимуществ и недостатков.

При этом необходимо отметить, что применяемые ранее традиционные виды аппроксимации волны тока в канале молнии в виде линейной комбинации экспоненциальных функций (например, с двумя, тремя и более членами) исследователей уже не устраивает и требуется применять более сложные их виды. Особенно это

касается теоретических исследований параметров электромагнитных полей, создаваемых грозowymi разрядами, где хорошо себя зарекомендовали дважды дифференцируемые виды аппроксимаций [2.27, 2.28].

Таблица 2.1 - Аналитические описания импульсов тока в канале молнии [2.1].

Аналитические выражения и значения параметров для волны тока молнии 2/50 мкс и $I_M = 20$ кА	Характерные особенности	
	Преимущества	Недостатки
1	2	3
$i(t) = I_0 k [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)]$ $I_0 = 20 \text{ кА}; k = 1.037$ $a_1 = 0.0138 \cdot 10^6, \text{ с}^{-1}$ $a_2 = 1.6253 \cdot 10^6, \text{ с}^{-1}$	<p>Простота вида, легкость операций дифференцирования и интегрирования, простота Фурье-преобразования и преобразования Лапласа</p>	<p>Первая производная не обращается в ноль при $t=0$, а достигает своего максимального значения.</p>
$i(t) = I_1 \exp(-a_1 t) - I_2 \exp(-a_2 t) + I_3 \exp(-a_3 t)$ $I_1 = 20 \text{ кА}; a_1 = 5.0 \cdot 10^4, \text{ с}^{-1}$ $I_2 = 25 \text{ кА}; a_2 = 5.0 \cdot 10^5, \text{ с}^{-1}$ $I_3 = 5 \text{ кА}; a_3 = 7.0 \cdot 10^2, \text{ с}^{-1}$		
$i(t) = I_0 [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)] + I_1 \exp(-a_3 t)$ <p>Первый импульс молнии</p> $I_0 = 20 \text{ кА}; a_1 = 2.0 \cdot 10^4, \text{ с}^{-1}$ $a_2 = 2.0 \cdot 10^5, \text{ с}^{-1}$ <p>Последующие импульсы</p> $I_0 = 10 \text{ кА}; a_1 = 1.4 \cdot 10^4, \text{ с}^{-1}$ $a_2 = 6.0 \cdot 10^5, \text{ с}^{-1}$ <p>Промежуточный ток</p> $I_1 = 2.5 \text{ кА}; a_3 = 1.0 \cdot 10^3, \text{ с}^{-1}$		

1	2	3
$i(t) = I_0[\exp(-a_1 T) - \exp(-a_2 T^2)]$ <p>где $T = a_1/a_2 + t$; $I_0 = 21 \text{ кА}$; $a_1 = 0.014 \cdot 10^6, \text{ с}^{-1}$; $a_2 = 1.62 \cdot 10^{12}, \text{ с}^{-1}$</p>	<p>Первая производная существует и достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Сложность Фурье-преобразования и преобразования Лапласа</p>
$i(t) = I_0 \sqrt{\frac{\tau_1}{t}} \cdot e^{-\tau_2/2t}$ <p>$I_0 = 20 \text{ кА}$; $\tau_1 = 12.8 \cdot 10^{-6}, \text{ с}$ $\tau_2 = 3.46 \cdot 10^{-6}, \text{ с}$</p>	<p>Удобны при описании тока в процессе удара молнии в землю и линии связи; дважды дифференцируема; первая производная достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Сложный аналитический вид описания.</p>
$i(t) = I_0 \frac{1}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2}$ <p>$I_0 = 20 \text{ кА}$; $\eta = 0.933$; $n = 10$ $\tau_1 = 0.45 \cdot 10^{-5}, \text{ с}$; $\tau_2 = 143.0 \cdot 10^{-6}, \text{ с}$</p>	<p>Удобны при описании тока в процессе удара молнии в землю и линии связи; дважды дифференцируема; первая производная достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Сложный аналитический вид описания.</p>
$i(t) = \begin{cases} \alpha I_0 t \beta & \text{при } t \leq \tau_{30\%} \\ \gamma I_0 (e^{-a_1(t-\tau)} - e^{-a_2(t-\tau)}) & \text{при } t \geq \tau_{30\%} \end{cases}$ <p>$I_0 = 20 \text{ кА}$; $\alpha_1 = 0.52 \cdot 10^{-12}, \text{ с}^{-2}$ $\beta = 2.0$; $\gamma = 1.065$; $a_1 = 0.015 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ $a_2 = 0.893 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\tau = 0.532 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $\tau_{30\%} = 0.9 \cdot 10^{-6} \text{ с}$</p>	<p>Наиболее близко воспроизводят форму реального тока молнии в канале; производная достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Имеют точки разрыва и в них не дифференцируемы</p>
$i(t) = \begin{cases} I_0 \left(\frac{\lambda t}{\tau - 1} \right) & \text{при } t \leq \tau \\ I_0 e^{-a(t-\tau)} & \text{при } t \geq \tau \end{cases}$ <p>$I_0 = 20 \text{ кА}$; $\lambda = 7.62$; $a = 6110 \text{ с}^{-1}$; $\tau = 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ с}$</p>	<p>Наиболее близко воспроизводят форму реального тока молнии в канале; производная достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Имеют точки разрыва и в них не дифференцируемы</p>
$i(t) = \begin{cases} I_1 + [(I_0 + I_1)/\tau_1^2] t^2 & \text{при } t \leq \tau_1 \\ I_1 \exp[(t - \tau_1)/(\tau_2 - \tau_1)] \lg 0,5 & \text{при } t \geq \tau_1 \end{cases}$ <p>$I_1 = 20 \text{ кА}$; $\tau_1 = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $\tau_2 = 0.72 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ Промежуточный ток $I_0 = 2 \text{ кА}$</p>	<p>Наиболее близко воспроизводят форму реального тока молнии в канале; производная достигает максимума в точке $t \neq 0$</p>	<p>Имеют точки разрыва и в них не дифференцируемы</p>

2.1.2.2 Параметры тока нисходящей молнии положительной полярности

Большинство разрядов молнии облако-земля приводит к переносу отрицательного заряда от облака на землю, однако возникают разряды, которые переносят положительный заряд. Объемные положительные заряды находятся в областях r и P (см. рис 1.7), поэтому, естественно, можно ожидать появления и положительных разрядов.

На основе измерений электрического поля и визуальных наблюдений сделан вывод, что почти 92% импульсов переносили преимущественно отрицательный заряд и около 3% — преимущественно положительный заряд, остальные переносили как положительный, так и отрицательный заряды [2.3].

Известно только около 30 осциллограмм импульсов тока положительных молний [2.3]. Эти осциллограммы могут быть разбиты на две группы (рис. 2.3).

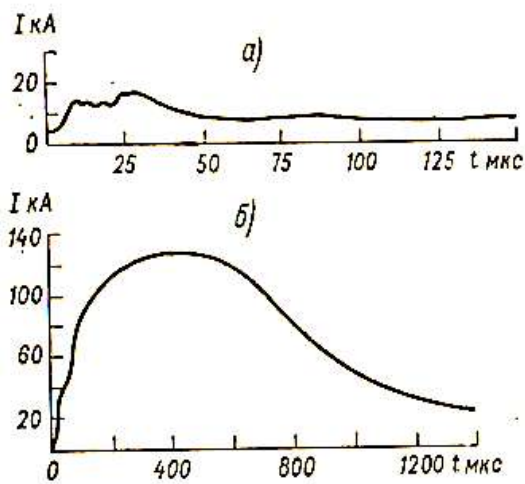


Рис. 2.3 – Типичные осциллограммы тока разряда молнии положительной полярности [2.3].

В первую попадают осциллограммы, форма импульса на которых аналогична импульсам тока нисходящей отрицательной молнии (рис. 2.3 а).

Поэтому можно предполагать, что такие импульсы тока относятся к положительным нисходящим молниям, главная стадия которых развивается подобно главной стадии отрицательных молний. Единственное отличие состоит в том, что

длительность импульса тока положительной молнии несколько больше, чем отрицательной, по-видимому, из-за меньшего коэффициента нейтрализации положительного заряда чехла лидера на головке главного канала и большей доли заряда, входящего в главный канал за счет медленного дрейфового движения.

Ко второй группе относятся осциллограммы тока (рис. 2.3 б) с длинным фронтом импульса, вплоть до 200 мкс, и большой длительностью импульса, достигающей 2000 мкс [2.5]. Формирование такого импульса тока никак нельзя представить себе в рамках процессов главной стадии, развитых выше. Вероятнее всего, разряды с большой длительностью импульса тока относятся к восходящим молниям, и процесс формирования их тока связан не столько с нейтрализацией заряда в чехле лидера, сколько с разрядом положительных грозовых ячеек. Свидетельством в пользу такого предположения является наличие на некоторых осциллограммах перед импульсом длительно протекающего тока небольшого значения, характерного для восходящего лидера. В ряде случаев полярность этого тока противоположна полярности основного импульса. Не смотря на большую длительность фронта крутизна положительных импульсов тока практически такая же, как для отрицательных, и может достигать 3.2×10^{10} А/с [2.5].

Токи молнии сложным образом меняется во времени. При положительной полярности заряда облака (примерно 10 % общего количества грозовых разрядов) он представляет собой однократный униполярный импульс и последующую за ним, так называемую постоянную составляющую тока молнии.

На рис. 2.4 показана типичная осциллограмма тока главного разряда положительной молнии.

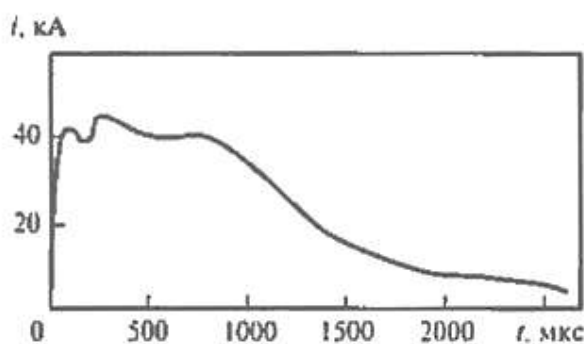


Рис. 2.4 - Типичная осциллограмма тока молнии, развивающейся с положительно заряженного облака

одного импульса [2.9].

Для положительных импульсов характерны относительно большие значения переносимого заряда (примерно в три раза больше, чем для отрицательного импульса), причем максимальная измеренная величина составляла около 350 Кл. Положительные разряды редко содержат более

2.1.2.3 Обобщенные максимальные статистические параметры тока молнии отрицательной и положительной полярности

Ток молнии каждого типа характеризуется специфическим изменением тока во времени. Так как условия накопления отрицательных и положительных зарядов в грозовом облаке не одинаковы то и по-разному формируются каналы разряда, и заряды, переносимые токами с облака на землю, оказываются не одинаковыми при разных видах молний - отрицательной и положительной полярности.

В процессе реализации организационно-технических мероприятий по обеспечению молниестойкости летательных аппаратов необходимо исходить из наиболее критических параметров ВВФ ЭМП грозовых разрядов, которые могут воздействовать на ЛА. Обобщенные максимальные статистические данные, отражающие полные сведения о параметрах токов различных видов молнии и их компонентов, приведены на рис. 2.4 – 2.9¹³.

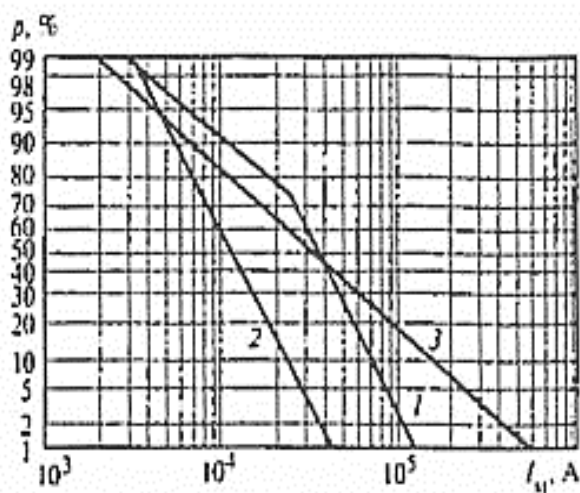


Рис. 2.4 – Статистические данные о максимальных значениях амплитуды токов различных видов молнии и их компонентов

- 1 - первый импульс отрицательной молнии;
- 2 - второй импульс отрицательной молнии,
- 3 - импульс положительной молнии.

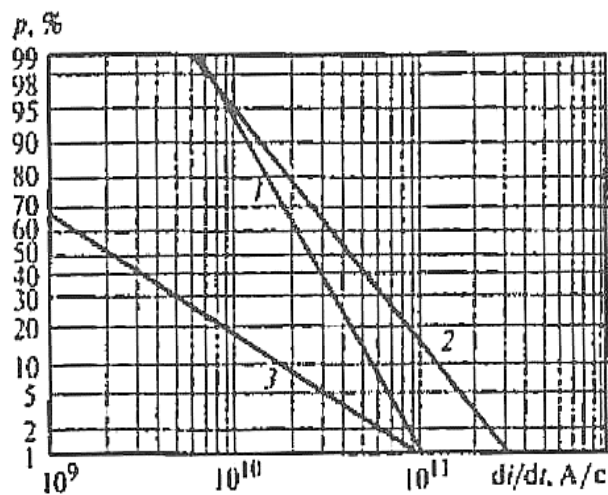


Рис. 2.5 – Статистические данные о максимальных значениях крутизны токов различных видов молнии и их компонентов

- 1 - первый импульс отрицательной молнии;
- 2 - второй импульс отрицательной молнии,
- 3 - импульс положительной молнии.

¹³ <https://ok-t.ru/studopedia/baza7/1364473484047.files/image569.jpg>

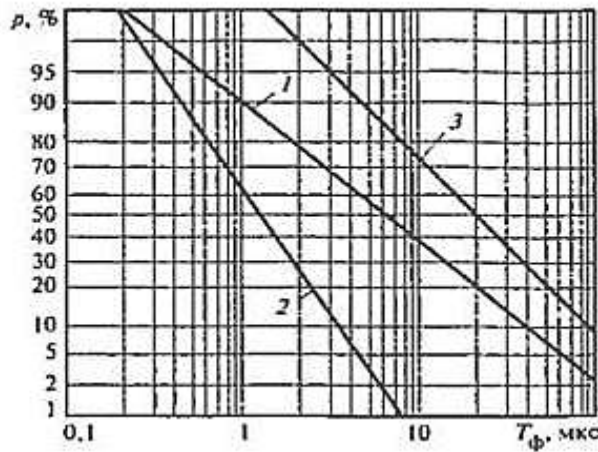


Рис. 2.6 – Статистические данные о максимальных значениях длительности фронта импульсов токов различных видов молнии и их компонентов
 1 - первые импульсы отрицательных молний;
 2- вторые импульсы отрицательных молний;
 3 - импульсы положительных молний

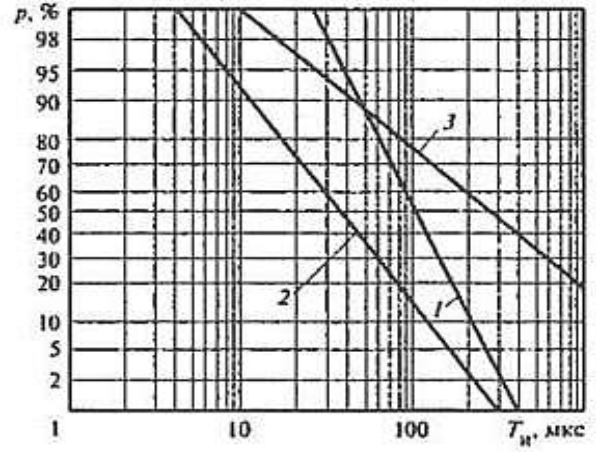


Рис. 2.7 – Статистические данные о максимальных значениях длительности импульсов токов различных видов молнии и их компонентов
 1 - первые импульсы отрицательных молний;
 2 - вторые импульсы отрицательных молний;
 3 - импульсы положительных молний

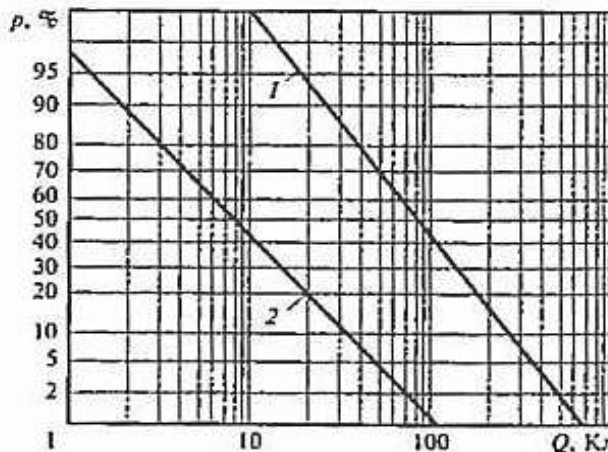


Рис. 2.8 – Статистические данные о максимальных значениях зарядов, переносимых токами молний различной полярности:
 1 - положительные молнии;
 2 - отрицательные

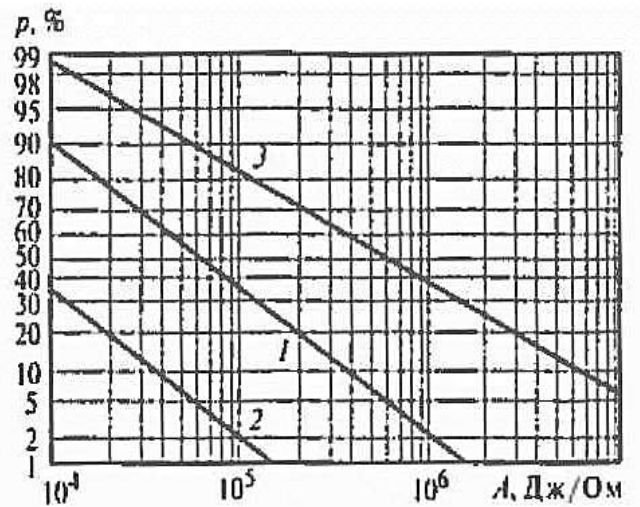


Рис. 2.9 – Статистические данные о максимальных значениях удельной энергии, переносимой токами молний различной полярности:
 1 - первые импульсы отрицательных молний;
 2 - повторные импульсы отрицательных молний;
 3 - импульсы положительных молний.

При определении вероятностных максимальных значений амплитудных параметров тока молнии, поражающего ЛА, также важно знать его временные параметры: длительность фронта и длительность импульса, а также значения о переносимых этими разрядами зарядах и удельной энергии, так называемой «интегралом действия».

Удельная энергия, или интеграл действия тока молнии по времени в основном определяется импульсными составляющими тока. Вклад постоянной составляющей тока молнии в «интеграл действия» A незначителен. Как и заряд Q , энергия A при положительных молниях выше, чем при отрицательных. Статистические данные о зарядах Q , переносимых на землю свидетельствует, что для положительных молний он намного больше, чем, при отрицательных.

2.1.3 Параметры тока облачной молнии

Данные виды молний чаще всего бывают во время гроз, возникающих высоко над землей, что является опасным при эксплуатации летательных аппаратов при прохождении ими грозовых облаков и фронтов.

На рис. 2.10 приведен аналог качественной осциллограммы тока облачной молнии, полученная косвенным путем посредством измерения электрического поля наземного разряда, полученная на антенну с большой постоянной времени [2.6, 2.9].

По мнению многих исследователей результатов измерений электрических полей было замечено что атмосферерики, вызванные разрядами облачных молний имеют форму аналогичную разрядам молний на землю [2.6].

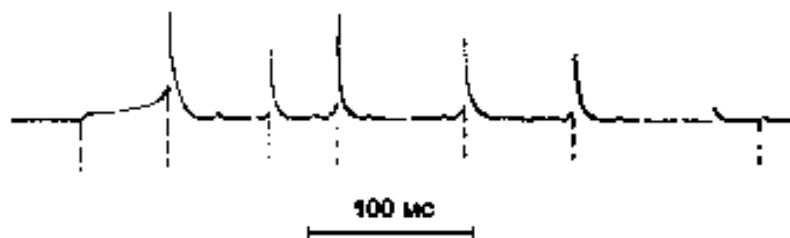


Рис. 2.10 - Типичная осциллограмма вида пульсации тока, облачного разряда молнии.

В связи с тем, что облачные разряды практически не имеют главной стадии разряда, они состоят исключительно из его лидерной стадии. В среднем число таких разрядов колеблется от 5 до 20 за период времени 100 мс. Средний интервал между импульсами составляет 8,5 мс с длительностью 6 мс [2.6]. Амплитуда токовых импульсов при этом заключена в интервале от 1 до 4 кА [2.9]. Переносимый при этом заряд изменяется в пределах от 0,3 до 100 Кл.

2.1.4 Параметры тока горизонтальной молнии

Горизонтальные молнии мало изучены. В научной и технической литературе о них практически отсутствуют данные, включая параметры токов горизонтальной молнии. В настоящее время горизонтальные молнии считаются наиболее мощными и опасными в своем роде.

Опасность таких молний кроется в их протяженности до 150 км. Согласно данных Всемирной метеорологической организации длина самой длинной молнии составила 321 км по горизонтали.

Горизонтальный разряд может нанести прямой удар по летящему в небе самолету, находящемуся, или подлетающему на регламентируемое требованиям безопасности эксплуатации ЛА в грозовой обстановке расстояние. При этом мощность разряда может достигать от 1 до 1000 ГВт. В этой связи электромагнитные помехи от токов таких молний являются самым опасным видом поражающего воздействия и дестабилизирующего влияния на радиоэлектронное, электронное и электрическое оборудование, а также авионику летательных аппаратов.

2.1.5 Обобщенные параметры грозовых электромагнитных полей линейных молний

Для описания большинства наиболее опасных по своим последствиям воздействий электромагнитных полей грозовых разрядов на ТС, как показано в [2.1] достаточно двух показателей: максимальные значения напряженности поля и максимальной скорости ее изменения на фронте импульса.

В отличие от токов молнии, поражающие параметры и структура электромагнитных полей грозовых разрядов изучены далеко не полно.

В большинстве работ, посвященных исследованиям структуры электрических полей предгрозового периода, в основном анализируются процессы формирования электрических полей объемными зарядами грозовых облаков с различной конфигурацией этих зарядов. Пространственное распределение напряженности электрического поля от облака с объемным зарядом одной полярности исследовалось в [2.4, 2.9, 2.13], со смешанной полярностью, определяемой двумя и тремя разноименными зарядами в [2.4, 2.9, 2.15]. Значения напряженности электрических полей у поверхности земли под грозовым облаком, по приведенным в литературных источниках данным, составляют от 5 до 15 кВ/м. При этом во всех случаях процессы формирования этих электрических полей рассматривались без учета динамики во времени.

В [2.4, 2.9] были сделаны попытки оценить максимальные значения, а в [2.3] изменение во времени напряженности грозового электрического поля лидерной стадии молнии. И в том и в другом случаях моделью лидера служила вертикальная заряженная ось с постоянной линейной плотностью заряда $\rho_{л}$, прорастающая от облака к земле с постоянной скоростью $v_{л}$. Для нисходящего лидера с параметрами $\rho_{л} = 10^{-3}$ Кл/м, длиной канала - 4 км и $v_{л} = 3 \cdot 10^5$ м/с скорость изменения электрического поля непосредственно под лидером может достигать значений порядка 10^8 В/(м·с), при средних значениях напряженности электрического поля в 100 кВ/м [2.3]. Данные об изменениях напряженности магнитного поля лидерной стадии молнии практически не приводятся в виду относительно малых их значений по сравнению с параметрами напряженности магнитных полей главной стадии грозового разряда. В [2.6] приведены сравнительные данные отношения максимальных значений импульсов напряженности электрического поля главной стадии разряда и предразряда, полученные для расстояния до 100 км. Из анализа этих данных следует, что в среднем максимальные значения импульсов напряженности электрического поля главной стадии молнии в 30% случаев на порядок превышает соответствующие значения для импульсов предразряда. Этим

прежде всего и объясняется тот факт, что наибольшее количество работ посвящены именно определению параметров электромагнитных полей, формируемых молнией на главной стадии обратного разряда.

Анализ результатов многочисленных теоретических исследований в этой области [2.4, 2.29 – 2.42] показывает их противоречивость, что является следствием не всегда обоснованного или некорректного подхода к выбору математической модели расчета и пренебрежением в процессе постановки и решения этих задач рядом реально существующих в природе, и оказывающих значительное влияние на формирование ГЭМО, факторов. К таким факторам, прежде всего, относятся: реальная форма тока в канале разряда, процессы растекания токов молнии в земле и ее конечная проводимость, неравномерность распространения волн тока обратного разряда по каналу молнии, процессы отражения и преломления электромагнитных полей излучения канала молнии на проводящей поверхности земли.

Так, в первых фундаментальных работах, связанных с теоретическими исследованиями процессов формирования ГЭМО, широкое распространение получили математические модели, в которых канал разряда молнии представлялся в виде одного электрического диполя Герца [2.4] или монополя [2.6, 2.43] зеркально отображенного относительно поверхности земли, позволяющие оценивать величину грозового электромагнитного поля на расстояниях 10 км и более, то есть в дальней зоне излучения молнии. Зачастую, проводящий лидерный канал молнии представлялся в виде передающей длинной линии, по которой распространяется волна тока обратного разряда молнии [2.4, 2.29, 2.31], что давало возможность приближенно описывать процессы формирования ГЭМО в ближней зоне. Ряд авторов процессы формирования ГЭМО анализируют с помощью замены канала разряда молнии системой элементарных электрических диполей различной модификации [2.27, 2.31, 2.36, 2.37, 2.44]. В работе [2.34] представлен анализ различных методик.

При этом, как правило, принималось допущение о бесконечной проводимости земли, что не позволяло учитывать влияние земли на процесс формирования ГЭМО и, как следствие, определять горизонтальную составляющую электрического поля особенно у поверхности земли, в ближней к каналу разряда области.

Горизонтальная составляющая электрического поля на различных высотах от идеально проводящей поверхности земли в [2.26] определялась как составляющая электрического поля излучения канала молнии, возникающая из-за асимметрии расположения точки наблюдения относительно плоскости зеркального отображения канала разряда. Однако, в силу сделанных допущений о бесконечной проводимости земли и выбора расчетной модели, базирующейся на зеркальном отображении канала разряда, горизонтальная составляющая напряженности электрического поля на поверхности земли обращалась в ноль.

Попытка учесть влияние конечной проводимости земли на формирование ГЭМО была предпринята в работе [2.35], где горизонтальная составляющая напряженности электрического поля у поверхности земли определялась через ее вертикальную составляющую с помощью граничных условий Леонтовича для плоской электромагнитной волны, распространяющейся вдоль проводящей поверхности:

$$E_r(j\omega) \approx \frac{E_B(j\omega)}{\sqrt{\varepsilon_3' + \left(\frac{\sigma_3}{j\omega\varepsilon_3}\right)}} \quad (2.6)$$

где $E_r(j\omega)$ и $E_B(j\omega)$ - соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие напряженности электрического поля у поверхности земли; ε_3' - относительная диэлектрическая проницаемость земли; σ_3 - электропроводность земли.

Однако, этот метод не позволяет в полной мере получить достоверную информацию о характеристиках ГЭМО, особенно формируемой молнией в ближней к ее каналу области, когда расстояния от места разряда соизмеримы или меньше длины канала молнии, и для которых электромагнитная волна ее излучения не может быть интерпретирована как плоская.

Известны работы, посвященные исследованию ГЭМО в земле, с учетом ее электрофизических характеристик [2.38, 2.39]. Однако, результаты этих работ, в свою очередь, не учитывают электромагнитных процессов формирования ГЭМО каналом разряда молнии над поверхностью земли и ограничиваются исследованием этих процессов только в ее толще.

Как показывает анализ литературных источников, особое внимание при исследовании ГЭМО уделялось ближней зоне излучения молнии. В частности, в работах [2.26, 2.30], приведены результаты теоретических оценок значений параметров электрического и магнитного полей, создаваемых грозовым разрядом на главной стадии для расстояний от 20 до 200 м от канала молнии. Скорость изменения напряженности электрического поля на расстоянии 20 м составила около $0,5 \cdot 10^{12}$ В/(м·с), а на расстоянии 200 м - $2 \cdot 10^{10}$ В/(м·с) при скорости обратного разряда $v = 10^7$ м/с и токе молнии 20 кА. Максимальные значения напряженности электрического поля составили для расстояний 20 м - 200 кВ/м, 200 м - 10 кВ/м. Для магнитного поля результаты расчета при этих расстояниях имеют значения: 170 А/м и 18 А/м, а скорости изменения 10^8 А/(м·с) и $2 \cdot 10^7$ А/(м·с), соответственно.

В [2.45] на основе физических представлений о канале разряда молнии и результатов экспериментов было предложено следующее аналитическое выражение для напряженности электрического поля на расстояниях от канала молнии до 50 м:

$$E(t) = E_0 \frac{e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}}{1 + e^{-\gamma(t-\tau_0)}}, \quad (2.7)$$

где $\alpha = 4 \cdot 10^4$, с⁻¹; $\beta = 2.5 \cdot 10^6$, с⁻¹; $\gamma = 10^7$, с⁻¹ и $t_0 = 4 \cdot 10^{-7}$, с

Исходя из максимального значения поля при грозовом разряде $E_0 = 3$ МВ/м [2.45] для скорости изменения электрического поля получены величины $dE/dt = 10^{14}$ В/(м·с). В то время, как в [2.46] скорость изменения напряженности электрического поля для малых расстояний оценивается значениями $dE/dt = 3 \cdot 10^{12}$ В/(м·с).

Напряженность магнитного поля непосредственно у канала разряда, как показано в [2.9], аналитически может быть представлена с помощью формулы, вытекающей из закона полного тока:

$$H = i_m(t) / 2\pi r \quad (2.8)$$

Максимальное значение напряженности магнитного поля при грозовом разряде в этом случае можно ожидать порядка 10^4 А/м при скорости изменения 10^{10} А/(м·с).

Не меньше противоречий имеется в полученных различными авторами результатах теоретических исследований амплитудно-временных параметров и формы импульсных электромагнитных полей главной стадии грозových разрядов.

Так в [2.3, 2.4] закон изменения амплитуды напряженности электрического поля для расстояний меньше длины канала молнии определен как $1/r$ (где r - расстояние). В то же время в [2.9, 2.47] утверждается, что для этих расстояний напряженность электрического поля должна изменяться пропорционально $1/r^3$, а в [2.6, 2.48] практически не меняться с расстоянием.

Скорость нарастания импульса напряженности электрического и магнитного поля многие авторы [2.31, 2.33, 2.49] ставят в прямую зависимость от времени нарастания тока в канале молнии. В частности, в [2.25, 2.49] утверждается, что время нарастания импульса напряженности электрического поля равно или не более чем в два раза превышает время нарастания импульса тока в канале молнии. Тем самым эти исследователи становятся на позицию ряда авторов [2.32, 2.33] утверждающих, что формы электрического и магнитного полей излучения канала молнии в ближней зоне должны повторять форму тока в канале молнии. Если это утверждение для магнитного поля и может быть с определенным допущением принято, то для электрического поля, как следует из [2.50, 2.51], оно не верно.

Анализ структуры грозových электромагнитных полей показывает, что электрическое поле имеет сложную структуру и содержит медленно нарастающие и быстроизменяющиеся компоненты. Первая (электростатическая) компонента связана с распределением заряда по каналу молнии, вторая зависит от скорости изменения величины этих зарядов во времени и определяет электрическое поле излучения молнии [2.51]. В ближней зоне до 10 км основной вклад в напряженность электрического поля дает электростатическая компонента, а на расстояниях более 30 км - компонента излучения.

Ряд авторов [2.4, 2.40] наоборот считают, что форма тока в канале молнии не оказывает сколь либо существенного влияния на форму грозových электромагнитных полей, используя в своих расчетных моделях ток в виде прямоугольной волны или волны с косоугольным фронтом бесконечной длительности, что в конечном

итоге приводило к получению противоречивых с экспериментальными данными результатов.

В известных литературных источниках, содержащих информацию о параметрах грозových электромагнитных полей, ограничены сведения об измерениях максимальных значений и скорости изменения электрического поля в ближней к каналу грозового разряда области. В основном, измерения проводились на значительном расстоянии от канала разряда порядка 10...50 км [2.52 – 2.55], и затем уже эти результаты экстраполировались на более близкие расстояния: 100 м [2.56], 1 км [2.57, 2.58], 3 км - 5 км [2.29, 2.59]. Информация о магнитном поле, создаваемом грозowymi разрядами в ближней зоне излучения также ограничена. Исключение составляют данные о магнитных полях, возникающих в непосредственной близости от молниеотводов [2.3].

В [2.6] приведены аналитические выражения, полученные на основе анализа экспериментальных данных, которые описывают изменения максимальных значений напряженности электрического и магнитного полей главной стадии грозового разряда над поверхностью земли в зависимости от расстояния до канала молнии:

- для расстояний от 1 до 4 км напряженность электрического поля практически не изменяется с расстоянием и принимает значение $E(\text{В/м}) \approx 0.2 I_m$ (где I_m - амплитуда тока в канале молнии, А), напряженность магнитного поля - $H \approx I_m/2\pi r$;

- для расстояний 4...20 км напряженность электрического поля убывает по закону: $E(\text{В/м}) \approx 106/r^3$ (км);

- на расстоянии более 30 км, когда преобладают поля излучения, зависимость напряженности электрического поля от расстояния имеет вид: $E(\text{В/м}) \approx 300/r$ (км).

На рисунке 2.11 в качестве примера представлены графические зависимости изменения максимальных значений напряженности грозových электрического и магнитного полей главной стадии молнии над поверхностью земли [2.6] и ниже ее уровня [2.39] от расстояний до места разряда.

Однако и в этом случае результаты экспериментальных исследований, приведенных в [2.6], значительно отличаются от данных, опубликованных в [2.57]. Здесь, в частности, утверждается, что для ближних разрядов (0...10 км) изменение усредненных

значений напряженности электрического поля от расстояния должно происходить по закону: $E(\text{В/м}) = 2046 \cdot r^{-1.375}$ (значение r в км).

И только для дальних зон излучения молнии (более 50 км) практически все результаты теоретических и экспериментальных исследований как амплитудно-временных параметров электромагнитных полей излучения молнии, так и их формы у большинства авторов совпадают [2.6, 2.37, 2.44].

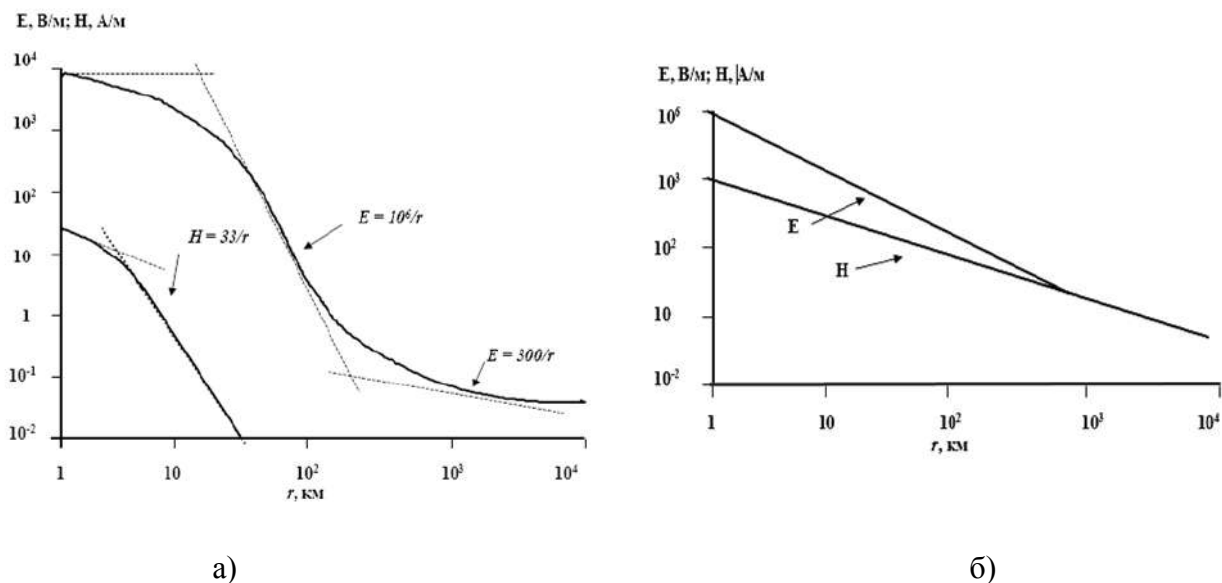


Рис. 2.11 - Изменение амплитуды напряженности поля главной стадии грозового разряда в зависимости от расстояния до канала молнии:

а) - над поверхностью земли [2.6]; б) - в толще земли [2.50].

Таким образом, анализ работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям электромагнитных процессов, сопровождающих грозовые разряды и формируемые ими ВВФ ЭМП, показали низкую достоверность, а зачастую и противоречивость их результатов, особенно для ближней зоны излучения молнии, когда расстояния до канала разряда соизмеримы или меньше его длины.

Основными причинами противоречивости имеющихся результатов грозовых электромагнитных полей ближней зоны излучения канала молнии являются: несовершенство математических моделей грозовых разрядов, используемых исследователями, и не всегда обоснованное пренебрежение в процессе постановки и решения задачи рядом реально

существующих природных факторов, существенно влияющих на процессы формирования ГЭМО.

К такому фактору, прежде всего, относятся: реальная форма тока в канале молнии, процессы растекания тока молнии в земле, ее конечная проводимость, неравномерность распределения волны тока обратного разряда по каналу молнии, процессы отражения и преломления электромагнитных полей излучения молнии на проводящей поверхности.

Следовательно, для получения достоверных результатов о структуре электромагнитных полей, создаваемых грозowymi разрядами необходимы углубленные теоретические исследования формирования ГЭМО для всех ее стадий, и, особенно в ближней зоне излучения.

2.2 Структура грозowych электромагнитных полей

2.2.1 Электрические поля предразрядного периода

Электрические поля предразрядного периода включают в себя поле предгрозового периода и лидерной стадии молнии [9]. Источником напряженности электрического поля *предгрозового периода* являются грозовые облака (тучи), несущие в себе скопление зарядов той или иной полярности, занимающих объемы в несколько кубических километров. Как отмечается в [2.9], одноименные заряженные тучи могут существовать лишь как исключение. Обычно результаты измерений напряженности поля, осуществляемых у поверхности земли [2.9, 2.13, 2.44, 2.60, 2.61], указывают на сложную структуру грозового облака со смешанной полярностью. Анализ результатов многочисленных измерений топологии напряженности электрического поля у поверхности земли в предгрозовой период [2.44] дает основание утверждать, что тучи содержат три объемных заряда различной полярности, которые располагаются на различной высоте над землей в грозовом облаке.

На рис. 2.12 представлена картина наиболее вероятного распределения объемных грозowych разрядов в облаке, встречающаяся в 90% случаев [2.9].

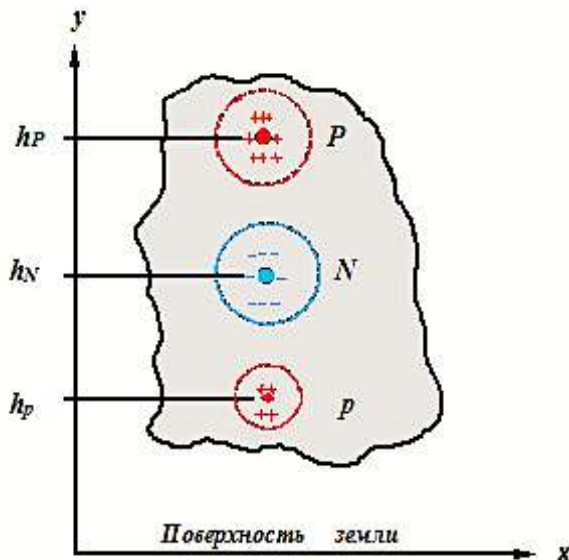


Рис. 2.12 - Картина распределения зарядов в грозном облаке со смешанной полярностью [2.9].

Обычно верхняя часть облака заряжена преимущественно положительно (заряд P), а нижняя часть - отрицательно (заряд N) и у самой нижней кромки грозного облака в относительно небольшой области сконцентрированы заряды положительной полярности (заряды p). Таким образом, грозное облако по структуре основных зарядов представляет собой электрический диполь.

Величина одноименных зарядов и высота их расположения над

поверхностью земли в основном зависит от географической широты [2.30]. Так для районов Южной Африки величины p , N и P и их высота над поверхностью земли принимают значение соответственно: +10 Кл (2 км), -40 Кл (5 км) и +40 Кл (10 км). В Японии были зафиксированы значения +24 Кл (3 км), -120 Кл (6 км) и +120 Кл (8.5 км) соответственно. Измерения зарядов грозного облака для Европейского региона показали, что их значения соответствуют: +4 Кл (1.5 км), -24 Кл (3 км) и +24 Кл (6 км).

На рис. 2.13 а приведены изменения напряженности электрического поля у поверхности земли в зависимости от расстояния, которые были построены с помощью следующей аналитической зависимости [2, 9]:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{ph_p}{(h_p^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{Nh_n}{(h_n^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{Ph_p}{(h_p^2 + x^2)^{3/2}} \right]. \quad (2.9)$$

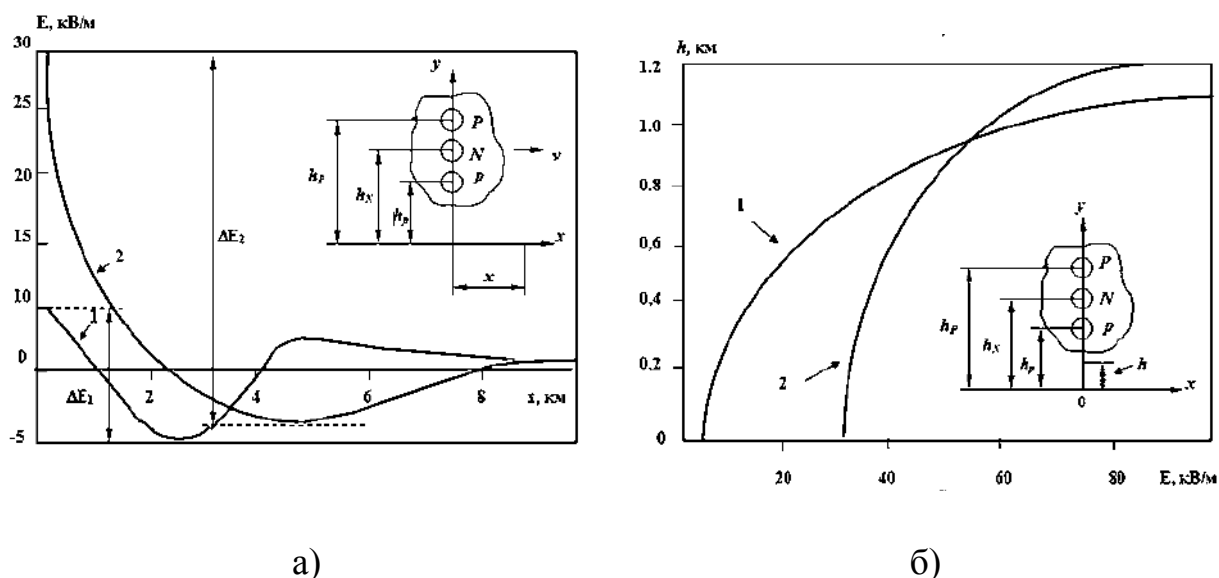


Рис. 2.13 - Зависимость напряженности электрического поля у поверхности земли от расстояния (а) и от высоты (б) от грозового облака [2.1].

1 - $P = +24$ Кл ($h_p = 6$ км); $N = -24$ Кл ($h_N = 3$ км); $p = +4$ Кл ($h_p = 1.5$ км).
 2 - $P = +40$ Кл ($h_p = 10$ км); $N = -40$ Кл ($h_N = 5$ км); $p = +10$ Кл ($h_p = 2$ км)

Несмотря на то, что величина электрического поля, рассчитанная по (2.9) не учитывает взаимного влияния пространственных зарядов между облаками и землей, вокруг облака или между облаками и ионосферой, данная модель достаточно хорошо описывает распределение напряженности электрического поля у поверхности земли от грозового облака в предгрозовой период.

По мере приближения к грозовому облаку напряженность электрического поля увеличивается (рис. 2.13б). Данные непосредственных измерений напряженности электрического поля в грозовом облаке показывают, что их значения колеблются в пределах от 10^5 В/м до $8 \cdot 10^5$ В/м [2.61].

Электрическому полю предгрозового периода свойственно изменение не только в пространстве, но и во времени. В основном, изменение напряженности электрического поля предгрозового периода во времени связано с перемещением грозовых облаков над поверхностью земли за счет горизонтальных воздушных потоков (ветра) и восстановления зарядов в облаке после разряда молнии.

Как правило, перемещение грозового облака над поверхностью земли в горизонтальном направлении происходит со средней скоростью 40 км/час [2.1]. Если учесть, что для варианта 1 (рис. 2.7а) изменение напряженности электрического поля составляет $\Delta E_1 = 10$ кВ/м на расстоянии 2 км, и тогда, $|\Delta E/\Delta t|_{\text{ср}} \approx 0.05$ кВ/м·с, то для варианта 2 это значение будет, $|\Delta E/\Delta t|_{\text{ср}} \approx 0.08$ кВ/м·с.

Среднее время восстановления разрядов в грозовом облаке после разряда молнии по [2.15, 2.16] близко к 5 с, соответственно скорость изменения поля у поверхности земли не будет превышать значений $E/\Delta t = 20$ кВ/м·с.

Существенно большие максимальные значения напряженности электрического поля и скорости их изменения во времени характерны для *лидерной стадии* молнии. Простейшей, но достаточно корректной моделью нисходящего лидера может служить вертикальная заряженная ось с постоянной линейной плотностью заряда ρ_l , удлиняющаяся к земле с постоянной скоростью v_l от отрицательного объемного заряда грозового облака N , расположенного на высоте H от ее поверхности.

Для нисходящего лидера переменная составляющая напряженности электрического поля у поверхности земли определяется выражением [2.2, 2.3]:

$$\Delta E.(t) = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon H} \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{H^2} + \left(1 - \frac{v_l t}{H}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{H^2} + 1}} - \frac{\frac{v_l t}{H}}{\sqrt{\left(\frac{x^2}{H^2} + 1\right)^3}} \right] \right\} \quad (2.10)$$

На рис. 2.14 приведены зависимости изменения напряженности электрического поля лидерной стадии молнии для различных расстояний от лидера.

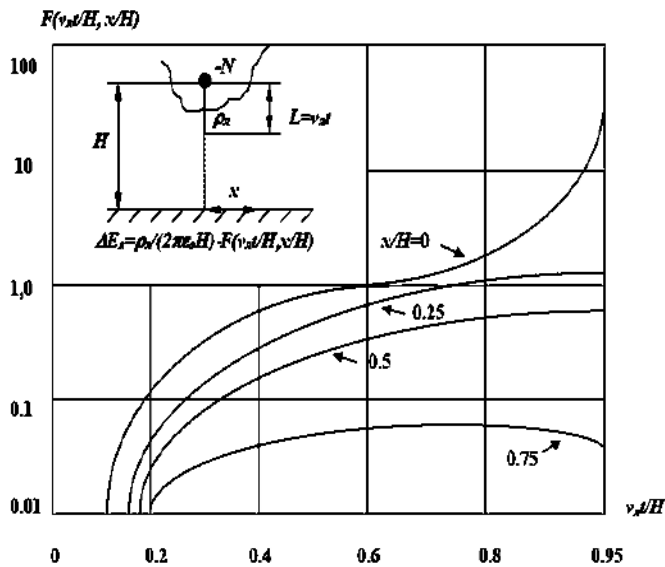


Рис. 2.14 - Зависимость изменения напряженности электрического поля от длины лидера.

порядок $2 \cdot 10^5$ кВ/(м·с).

Следовательно, в предразрядный период можно ожидать возникновение напряженности электрического поля с максимальным значением от 5 до 200 кВ/м и средней скоростью изменения во времени от 0.1 до $2 \cdot 10^5$ кВ/(м·с).

2.2.2 Электромагнитные поля главной стадии разряда молнии

Наибольшее электромагнитное влияние молния оказывает в период главной стадии (обратного разряда) [2.2], поэтому исследование ГЭМО этой стадии грозового разряда является одним из основных этапов в процессе обеспечения требований грозовой электромагнитной стойкости ЛА.

Для исследования электромагнитных процессов, сопровождающих грозовые разряды, и определения характеристик ГЭМО, создаваемых молнией “облако-земля” на ее главной стадии разряда, целесообразно воспользоваться методом участков, базирующимся на широко используемом в теории антенн вычислительном методе анализа процессов излучения электрически длинных систем сложной конфигурации [2.62].

Для первичного лидера со средними параметрами $\rho_l = 10^{-3}$ Кл/м, $H = 3 \cdot 10^3$ м и $v = 3 \cdot 10^5$ м/с величина ΔE_l у земли, непосредственно под лидером достигает значений порядка 200 кВ/м за время 100 мс, в течение которого головка лидера опускается до высоты 100 м над землей.

Таким образом, средняя скорость изменения напряженности электрического поля в лидерной стадии имеет

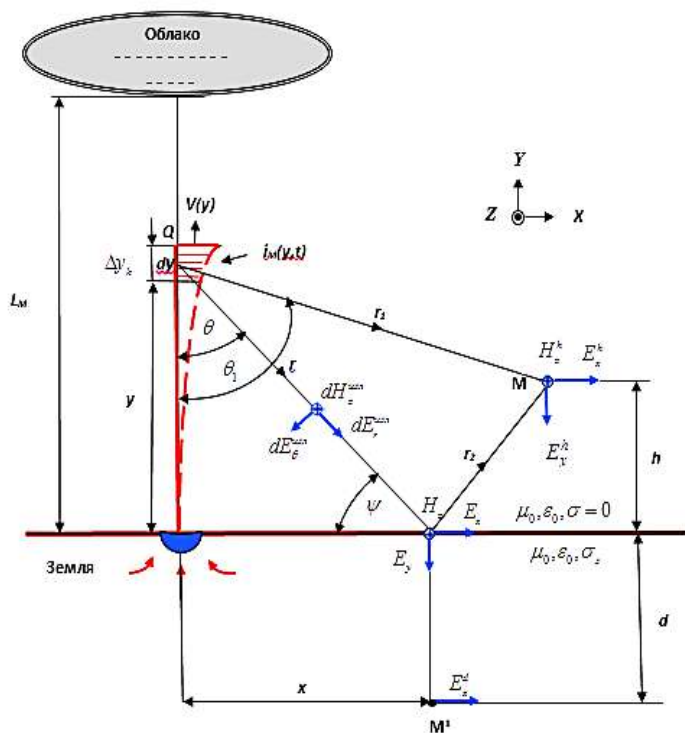


Рис. 2.15 – Расчетная модель

На рис. 2.15 приведена предложенная авторами расчетная модель [2.2, 2.50, 2.51], где канал разряда молнии представлен в виде прямолинейного проводника длины L_M , расположенного перпендикулярно к поверхности земли, по которому с переменной скоростью $v(y)$ распространяется волна импульсного тока молнии обратного разряда $i_M(y, t)$.

На рис. 2.16 и 2.17 приведены принятые при решении задачи форма тока в канале молнии и графическая зависимость изменения во времени длины канала в процессе развития обратного разряда.

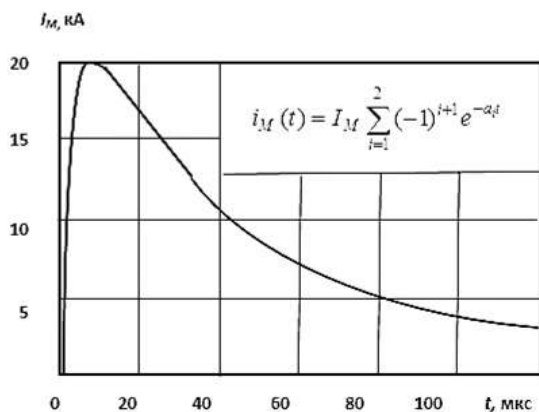


Рис. 2.16 - Форма тока молнии в канале разряд
 $I_M = 20 \text{ кА}$; $a_1 = 1,46 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$,
 $a_2 = 1,68 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ [2.1].

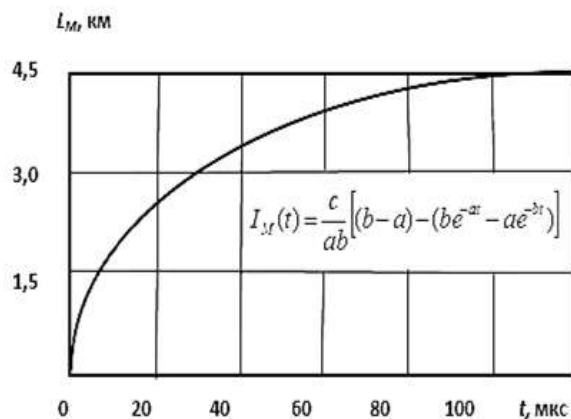


Рис. 2.17 - Изменение во времени высоты канала молнии в процессе обратного разряда. $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$;
 $a = 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$; $b = 7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$; [2.6].

В [2.50, 2.51] было предложено канал разряда молнии с током представить в виде достаточно большого числа элементарных электрических диполей, скалярный и векторный потенциал которых на бесконечности удовлетворяет условию Лоренца. При этом принималось, что элементарные диполи не оказывают взаимного влияния друг на друга.

Суть предложенного метода участков заключалась в разбиении длины канала разряда молнии L_M и импульса тока молнии $i_M(y, t)$ на функционально зависимые между собой участки. При этом канал разряда молнии разбивали на участки Δy_k , объединяющие в себе группу элементарных диполей, а импульс тока молнии на временные участки с шагом Δt_k . Величина участков разбиения канала разряда молнии соответствовала длине пути, который проходит волна обратного разряда за время, соответствующее шагу разбиения импульса тока молнии. Длина участков разбиения канала разряда и шаг разбиения тока молнии по времени для каждого из этих участков выбирался из условия равномерного распределения плотности тока по длине участка, допущения, что длина этого участка является малой по сравнению с длиной, излучаемой им волны электрического поля, а также условия, что падающая на границу раздела двух сред воздух-земля электромагнитная волна излучения каждого из участков является плоской.

Данный подход позволяет изначально учесть влияние на процесс формирования ГЭМО таких факторов, как форма тока молнии и неравномерность распределения волны обратного разряда по длине канала молнии.

Для компонент электромагнитного поля излучения элементарного участка тока молнии, согласно [2.63], в выбранной системе декартовых координат справедливы следующие аналитические выражения:

$$dE_y^{uz.l}(j\omega) = -\frac{I_M(j\omega)}{4\pi} \left[\frac{2y^2 - x^2}{j\omega\epsilon_0 r^5} + \frac{\xi_0(2y^2 - x^2)}{r^4} - \frac{j\omega\mu_0 x^2}{r^3} \right] dy \quad (2.11)$$

$$dE_x^{uz.l}(j\omega) = -\frac{3I_M(j\omega)xy}{4\pi} \left[\frac{1}{j\omega\epsilon_0 r^5} + \frac{\xi_0}{r^4} - \frac{j\omega\mu_0}{3r^3} \right] dy \quad (2.12)$$

$$dH_z^{uz.l}(j\omega) = \frac{I_M(j\omega)x}{4\pi} \left[\frac{j\omega}{cr^4} - \frac{1}{r^3} \right] dy \quad (2.13)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света; $\xi_0 = 120\pi$, Ом - волновое сопротивление воздушного пространства; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Интегрирование приведенных выражений производится по длине канала разряда молнии для верхнего воздушного полупространства, ограниченного поверхностью земли, являющейся границей раздела двух сред с различными электрофизическими характеристиками. При этом принималось, что земля обладает однородными и изотропными свойствами и имеет хорошую проводимость, $\sigma_3 \gg j\omega\epsilon_0$.

Граничные условия на поверхности земли (H^0, E^0) задавались с учетом процессов взаимодействия электромагнитной волны излучения канала молнии с проводящей поверхностью земли, а также процессов, связанных с растеканием токов молнии в земле. Тогда, с учетом допущения отсутствия излучения электромагнитной энергии в воздушное пространство из земли и вертикальной поляризации электромагнитной волны излучения канала молнии, граничные условия будут иметь вид:

$$H_z^0(j\omega) = [1 + R_b(j\omega)]H_z^{uz,l}(j\omega) \approx 2 \left(1 - \frac{1}{\sin \psi} \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_3}} \right) H_z^{uz,l}(j\omega) \quad (2.14)$$

$$E_y^0(j\omega) = [1 + R_b(j\omega)]E_y^{uz,l}(j\omega) \approx 2 \left(1 - \frac{1}{\sin \psi} \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_3}} \right) E_y^{uz,l}(j\omega) \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} E_x^0(j\omega) &= [1 - R_b(j\omega)]E_x^{uz,l}(j\omega) - E_x^{3eM}(j\omega) \approx \\ &\approx \frac{2}{\sin \psi} \sqrt{\frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_3}} E_x^{uz,l}(j\omega) - E_x^{3eM}(j\omega) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Где $R_b(j\omega)$ - коэффициент отражения вертикально поляризованной электромагнитной волны от проводящей поверхности; $E_x^{3eM}(j\omega)$ - напряженность электрического поля, создаваемого током растекания молнии в земле.

Правые части аналитических выражений (2.14) и (2.15) получены на основе упрощения полного выражения для коэффициента отражения $R_b(j\omega)$ при условии $\sigma_3 \gg j\omega\epsilon_0$ [2.64].

Первое слагаемое правой части аналитического выражения (2.16) является суть граничных условий Леонтовича для плоской электромагнитной волны, распространяющейся над поверхностью

земли. Второе слагаемое этого выражения представляет напряженность электрического поля, создаваемого токами молнии в земле, которое определялось из решения задачи о втекании тока от точечного источника в проводящее полупространство [2.65]:

$$E_x^{zem}(j\omega) = \frac{I(j\omega)}{2\pi x^3 \sigma_3} \left[x \sqrt{j\omega \mu_0 \sigma_3} + e^{-x \sqrt{j\omega \mu_0 \sigma_3}} \right] \quad (2.17)$$

Правомерность использования выражения (2.17) в качестве слагаемого в выражении (2.16) обосновывается принципом суперпозиции электромагнитных полей, создаваемых различными источниками и идентичностью граничных условий для напряженности магнитного поля на границе раздела проводящей и непроводящей сред от проводника с током, перпендикулярного проводящей поверхности [2.66] и токов растекания в проводящем полупространстве от точечного источника [2.65].

После перехода из частотной области во временную с помощью обратного преобразования Фурье с учетом принятых допущений, выражения для компонент напряженности электрического и магнитного полей k -го участка разбиения канала разряда молнии на поверхности земли с учетом эффекта запаздывания будет:

$$\Delta E_{y,k}^{uz,l}(x,t-r/c) = -\frac{I_M}{2\pi} \int_{y^{(k)}}^{y^{(k+1)}} \left\{ \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} e^{a_i r/c} \left(\frac{2y^2 - x^2}{\varepsilon_0 a_i r^5} - \frac{\varepsilon_0 (2y^2 - x^2)}{r^4} + \frac{\mu_0 a_i x^2}{r^3} \right) \left[e^{-a_i t} - \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\pi \sigma_3}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - 2a_i \sqrt{t} e^{-a_i t} \right) \right] \right\} dy \quad (2.18)$$

$$\Delta E_{x,k}^{uz,l}(x,t-r/c) = -\frac{3I_M x}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\pi \sigma_3}} \int_{y^{(k)}}^{y^{(k+1)}} \left\{ \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} e^{a_i r/c} \left(\frac{y}{\varepsilon_0 a_i r^5} - \frac{\varepsilon_0 y}{r^4} + \frac{\mu_0 a_i y}{3r^3} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - 2a_i \sqrt{t} e^{-a_i t} \right) \right\} dy \quad (2.19)$$

$$\Delta H_{z,k}^{uz,l}(x,t-r/c) = \frac{I_M x}{2\pi} \int_{y^{(k)}}^{y^{(k+1)}} \left\{ \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} e^{a_i r/c} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{a_i}{cr^2} \right) \times \left[e^{-a_i t} - \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\pi \sigma_3}} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - 2a_i \sqrt{t} e^{-a_i t} \right) \right] \right\} dy \quad (2.20)$$

Тогда напряженность электрического и магнитного полей излучения канала молнии определяется как суммарное от участков разбиения, каждый из которых последовательно “включается” в определенный момент времени, соответствующий времени задержки распространения по каналу разряда волны тока молнию.

С учетом вышеизложенного для напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых каналом разряда отрицательной молнии “облако-земля” на поверхности земли будут справедливы следующие аналитические выражения:

$$E_y(x,t) = \sum_{k=0}^N \Delta E_{y,k}^{uz,l}(x,t - y/v - r/c) \quad (2.21)$$

$$E_x(x,t) = \sum_{k=0}^N \Delta E_{x,k}^{uz,l}(x,t - y/v - r/c) + \Delta E_{x,k}^{3e,m}(x,t - x/v) \quad (2.22)$$

$$H_z(x,t) = \sum_{k=0}^N \Delta H_{z,k}^{uz,l}(x,t - y/v - r/c) \quad (2.23)$$

где v - скорость распространения тока обратного разряда по каналу; c - скорость света.

В виду замкнутости системы глобальной электрической цепи разряда молнии скорость распространения электромагнитной волны в земле принимается равной скорости распространения волны тока обратного разряда.

Напряженность электрического поля на поверхности земли от токов растекания молнии для выбранного вида аппроксимации этого тока имеет вид:

$$E_x^{3e,m}(x,t) = \frac{I_M}{2\pi x^2 \sigma_3} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} \left\{ \left(1 - x \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma_3}{\pi}} \right) e^{-a_i t} \cos(x \sqrt{a_i \mu_0 \sigma_3}) - \right. \quad (2.24)$$

$$\left. - 2e^{-a_i t} \sqrt{\frac{t a_i}{\pi}} \left[x \sqrt{a_i \mu_0 \sigma_3} - \sin(x \sqrt{a_i \mu_0 \sigma_3}) \right] \right\}$$

Как показал анализ результатов расчета, для выполнения принятых в рамках постановки задачи допущений и достижения заданной в процессе счета погрешности в пределах 1% для

усредненной длины накала молнии (1,5 км) необходимо число разбиений брать не менее $N = 200$.

Значения напряженности электрического и магнитного полей излучения канала молнии на различных высотах от поверхности земли определялись с помощью принципа суперпозиции “прямого” и отраженного от поверхности земли полей. Действительно, если обратиться к рис. 2.9, то для нахождения полного поля в точке М надо произвести наложение двух волн, одна из которых формируется при прямом распространении электромагнитной энергии из Q в М, а другая - при отражении [2.67]. Тогда для полного поля справедливо равенство:

$$\vec{E}(x, h, t) = \vec{E}(r_1, \theta_1, t) + R_b \vec{E}(r', \theta, t) \quad (2.25)$$

С учетом запаздывания вдоль путей r_1 (прямая волна) и $r' = r + r_2$ (отраженная волна) запись (2.25) представляет собой общую постановку задачи. Выражение (2.25) имеет простое физическое содержание, элементарно математически и с учетом ранее приведенных аналитических зависимостей (2.11 - 2.24) решает поставленную задачу определения параметров ГЭМО над поверхностью земли.

Для определения напряженности электрического поля в земле, на глубине d от ее поверхности, в качестве промежуточного в общей схеме решения, использовалось такое выражение [2.68]:

$$E_x^d(j\omega) = E_x(j\omega) e^{-d \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_3}} \quad (2.26)$$

где $E_x(j\omega)$ - напряженность горизонтальной составляющей электрического поля на поверхности земли.

Описанная методика теоретических исследований электромагнитных процессов, сопровождающих главную стадию разряда молнии, легла в основу анализа формирования ГЭМО и определения ее параметров.

На рис. 2.18 - 2.20 приведены результаты расчета временного изменения напряженности электрического и магнитного поля у поверхности земли в зависимости от расстояния до места разряда отрицательной молнии “облако-земля” с параметрами, соответствующими значениям, приведенным на рис. 2.16 - 2.17.

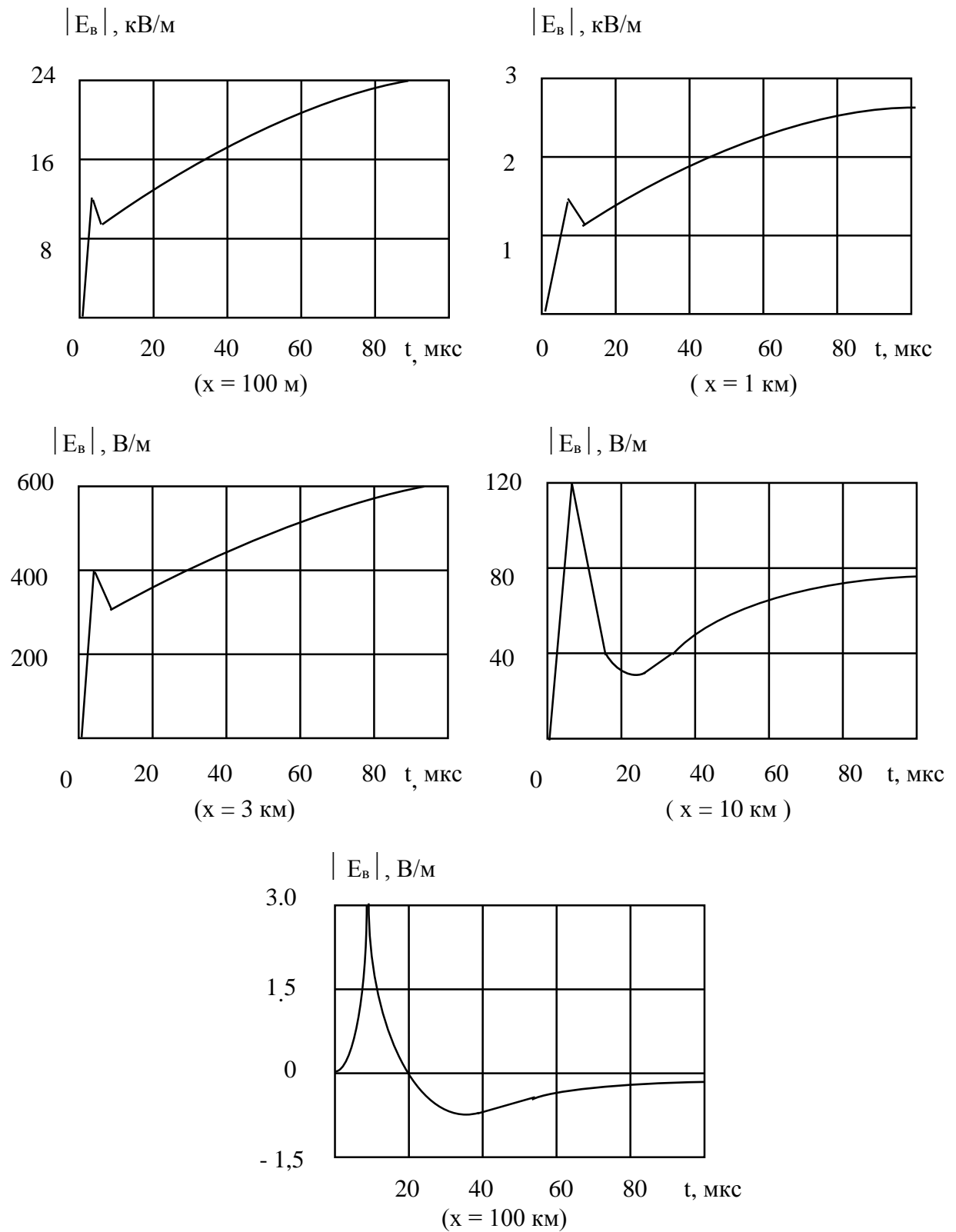


Рис. 2.18 - Вертикальная составляющая напряженности электрического поля, создаваемая молнией у поверхности земли для различных расстояний от места разряда.

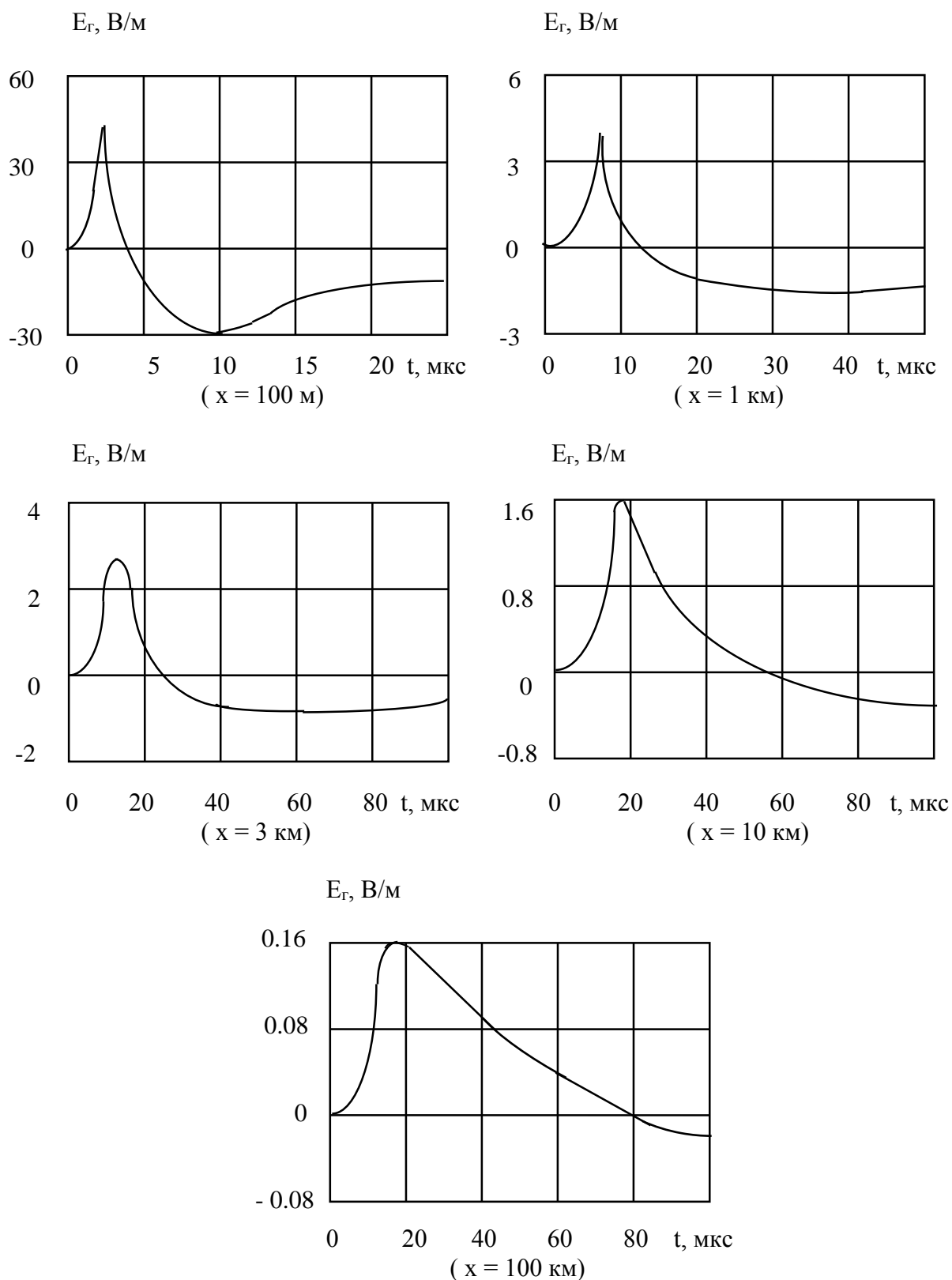


Рис. 2.19 - Горизонтальная составляющая напряженности электрического поля, создаваемая молнией у поверхности земли с электропроводностью $\sigma_3=10^{-2} \text{ См/м}$ для различных расстояний от места разряда.

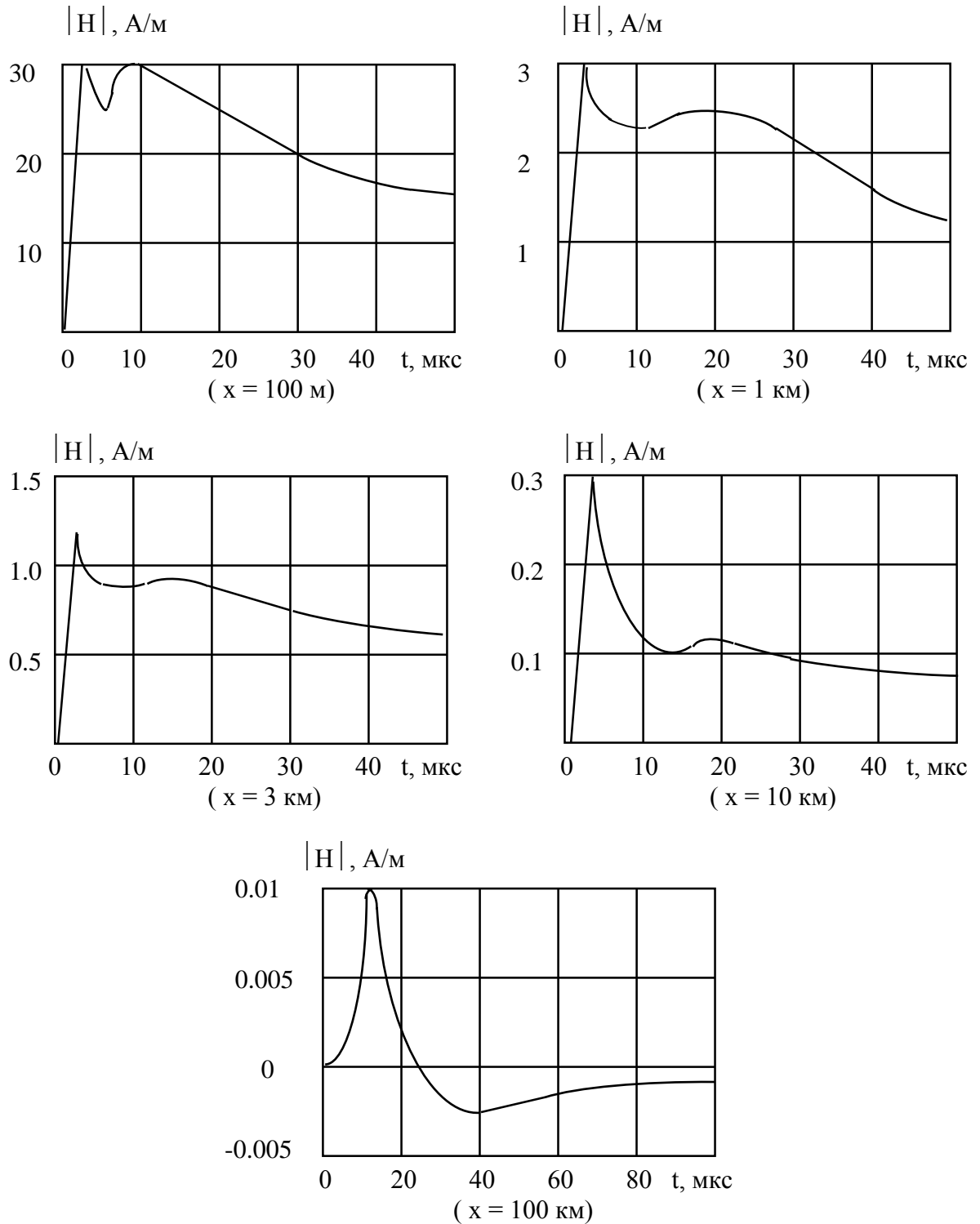


Рис. 2.20 - Напряженность магнитного поля, создаваемая молнией у поверхности земли для различных расстояний от места разряда.

Сравнение результатов теоретических исследований по разработанной методике как будет показано далее, дали хорошее совпадение с известными экспериментальными данными [2.27, 2.29, 2.56] и совсем новыми максимально достоверными [2.60 и 2.61], что подтверждает корректность предложенной математической модели грозового разряда и ее правомерность для определения поражающих параметров и дестабилизирующих характеристик грозových электромагнитных полей. На рис. 2.21 приведены сравнения результатов теоретических исследований ГЭМО по разработанной методике с экспериментальными данными, полученными рядом авторов в различное время [2.27, 2.29, 2.56]. Результаты экспериментов нормированы к амплитуде тока молнии $I_M=20$ кА.

2.2.3 Параметры электромагнитных полей разрядов молнии «облако-земля» в ближней зоне

Наибольший интерес в аспектах обеспечения требований электромагнитной стойкости ЛА к грозovým воздействиям представляет ГЭМО, которая соответствует ближней к каналу разряда области. В основном эта область определяется расстоянием от 20 до 100 м [2.26, 2.30, 2.46, 2.47]. Однако, говорить чисто об электромагнитном влиянии на радио- и электротехническое оборудование объектов на таких малых расстояниях от канала разряда, как 20 - 50 м [2.30, 2.45] проблематично, так как для них весьма высока вероятность прямого поражения этих объектов молнией. Действительно, если учесть, что искривление пути ступеней лидерного канала молнии в среднем находится в пределах до 100 м [2.51, 2.69, 2.70], то, как раз, расстояние в 100 м является предпочтительным, как базовое, при исследовании параметров близких грозových электромагнитных полей.

Наибольшее значение напряженность электрического поля ***предгрозového периода*** возникают непосредственно под облаком. По мере приближения к грозovому облаку напряженность электрического поля увеличивается и ее значение в грозovом облаке колеблется в пределах от 10^5 В/м до $8 \cdot 10^5$ В/м. Значения напряженности электрического поля у поверхности земли под грозovым облаком составляют от 5 до 40 кВ/м.

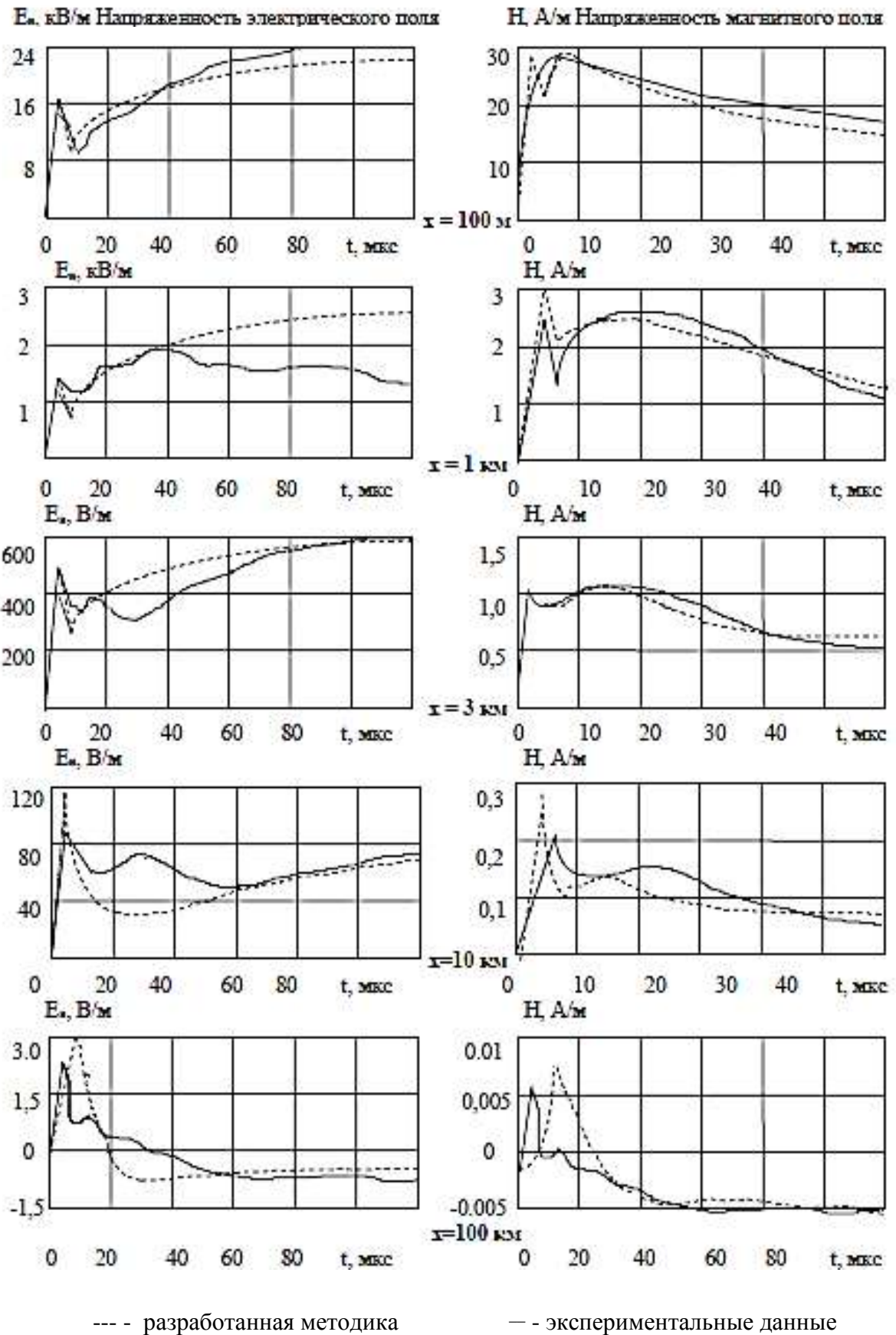


Рис. 2.21 - Сравнение результатов теоретических исследований ГЭМО с экспериментальными данными [2.56 – 2.61]

Критерием безопасного пуска объектов ракетно-космической техники в предгрозовой период является достижение значений напряженности электрического поля менее 14 кВ/м.

При этом, электрическому полю предгрозового периода свойственно изменение не только в пространстве, но и во времени. В основном, изменение напряженности электрического поля предгрозового периода во времени связано с перемещением грозовых облаков над поверхностью земли за счет горизонтальных воздушных потоков (ветра) и восстановления зарядов в облаке после разряда молнии. Как правило, перемещение грозового облака над поверхностью земли в горизонтальном направлении происходит со средней скоростью 40 км/час. Предположим, что изменение напряженности электрического поля составляет $\Delta E_z = 10$ кВ/м на расстоянии 2 км от облака. Тогда, скорость роста напряженности электрического поля $|\Delta E/\Delta t|_{\text{ср}} \approx 0,05$ кВ/(м·с).

Большие значения напряженности электрического поля и скорости ее изменения во времени характерны для *лидерной стадии* молнии. Для первичного нисходящего лидера со среднестатистическими параметрами $\rho_l = 10^{-3}$ Кл/м, $H = 3 \cdot 10^3$ м и $v = 3 \cdot 10^5$ м/с величина ΔE_l у земли, непосредственно под лидером достигает значений порядка 200 кВ/м за время 100 мс, в течение которого головка лидера опускается до высоты 100 м над землей. Таким образом, средняя скорость изменения напряженности электрического поля в лидерной стадии имеет порядок $2 \cdot 10^3$ кВ/(м·с).

Следовательно, в предразрядный период можно ожидать возникновение напряженности электрического поля с максимальным значением от 5 до 200 кВ/м и средней скоростью изменения во времени от 0.1 до $2 \cdot 10^3$ кВ/(м·с).

В основу оценки грозовой электромагнитной стойкости летательных аппаратов в процессе их эксплуатации закладываются параметры ГЭМО, формируемой разрядом *главной стадии линейной молнии* в ближней зоне (до 100 м). По результатам расчета по раннее приведенной модели, для среднестатистических параметров грозового разряда, на расстояниях в 100 м от канала разряда, значения его вертикальной составляющей электрического поля изменяется в пределах от -25 кВ/м у поверхности земли до +20 кВ/м на высоте 3 км от земли. Значения горизонтальной составляющей, соответственно, будут изменяться в пределах от

+20 кВ/м до +7 кВ/м на высоте 0,5 км и, затем, возрастает до +20 кВ/м на высоте 3 км. Соответственно, значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля у поверхности земли имеет значение 30 А/м, а на высоте 3 км – 12 А/м.

На рисунках 2.22 - 2.24 приведены результаты теоретических исследований по определению характера изменения и параметров напряженности электрического и магнитного полей на расстоянии 100 м от канала разряда молнии для различных высот над поверхностью земли и в ее толще.

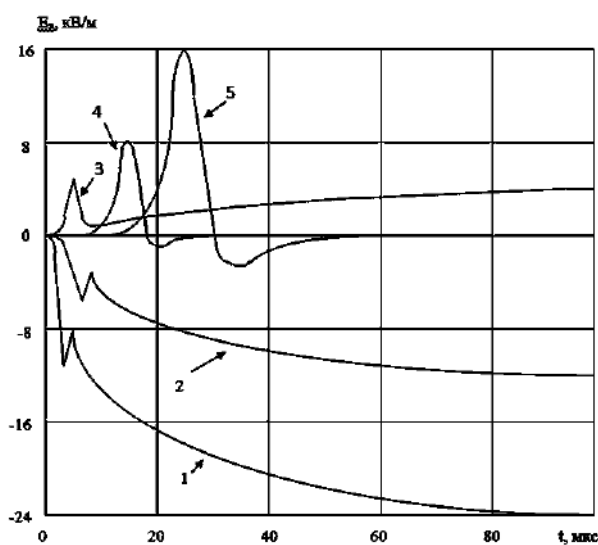


Рис. 2.22 - Напряженность вертикальной составляющей электрического поля, создаваемого молнией на расстоянии 100 м от места разряда для различных высот над поверхностью земли: 1 - 0 м; 2 - 100 м; 3 - 1 км; 4 - 2 км; 5 - 3 км

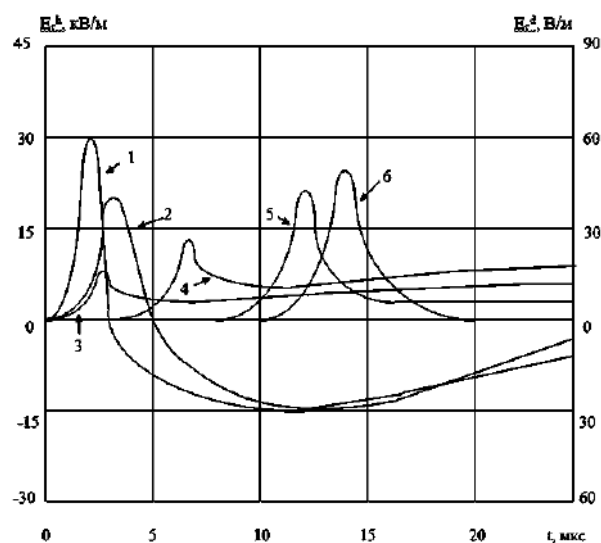


Рис. 2.23 - Напряженность горизонтальной составляющей электрического поля, создаваемого молнией на расстоянии 100 м от места разряда для различной высоты (h) над поверхностью земли и ниже ее уровня (d) при электропроводности земли $\sigma_3=10^{-2}$ См/м: 1 - d = - 5 м; 2 - d = 0; 3 - h = 100 м; 4 - h = 1 км; 5 - h = 2 км; 6 - h = 3 км.

Скорость изменения напряженности электрического поля на расстоянии 100 м составляет порядка $2 \cdot 10^{11}$ В/м·с при скорости обратного разряда $v = 10^7$ м/с и токе молнии 20 кА. Для магнитного поля результаты расчета скорости изменения имеют значения около $5 \cdot 10^7$ А/м·с при вышеприведенных параметрах тока молнии.

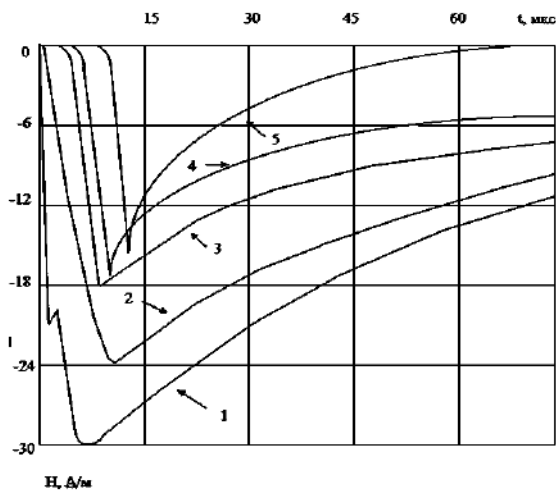


Рис. 2.24 - Напряженность магнитного поля, создаваемого молнией на расстоянии 100 м от места разряда для различной высоты над поверхностью земли (h):
 1 - $d = 0$ м; 2 - $h = 100$ м; 3 - $h = 1$ км;
 4 - $h = 2$ км; 5 - $h = 3$ км;

На рис. 2.25 – 2.26 приведены результаты расчета напряженностей электрического и магнитного полей главной стадии разряда молнии на расстоянии 100 м от канала разряда для различных высот над поверхностью земли, полученные с использованием выше приведенной расчетной методики.

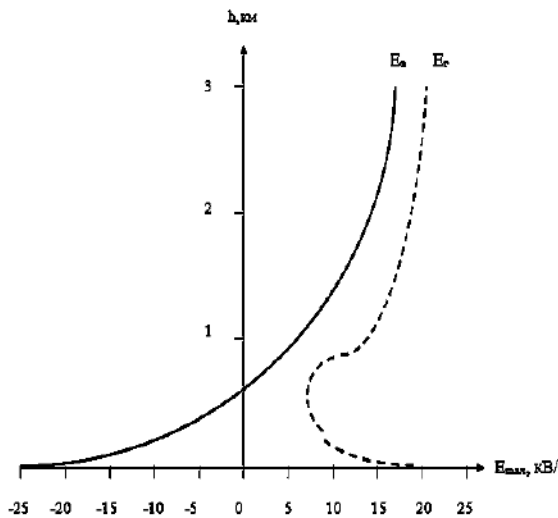


Рис. 2.25 - Распределение напряженности вертикальной составляющей электрического поля, создаваемого молнией на расстоянии 100 м от места разряда для различных высот над поверхностью земли.

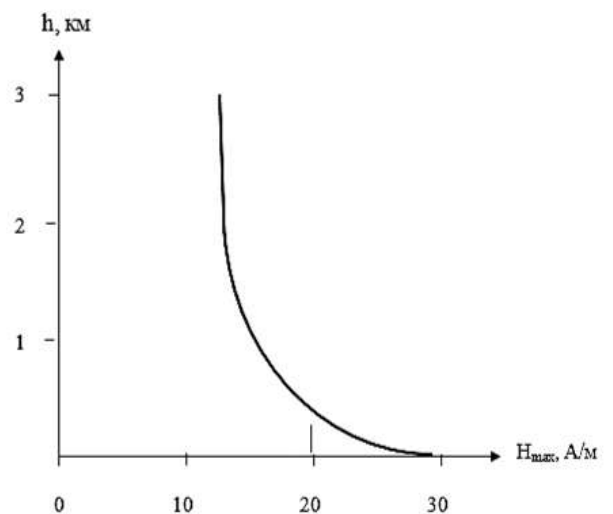


Рис. 2.26 - Распределение напряженности магнитного поля, создаваемого каналом молнии на расстоянии 100 м от места разряда для различных высот над поверхностью земли.

2.2.4 Параметры грозовой электромагнитной обстановки в аспектах обеспечения требований электромагнитной стойкости ТС наземных служб и стартовых комплексов ЛА

В [2.1, 2.2, 2.71, 2.72] показано, что в общем случае напряженности вертикального электрического и горизонтального магнитного полей у поверхности земли, как наиболее вероятные факторы, оказывающие поражающее воздействие на ТС, могут быть представлены в следующем упрощенном виде:

$$E(x, t) = \frac{60I_M}{x} F\left(\frac{vt}{x}, \frac{L_M}{x}\right), \quad (2.27)$$

$$H(x, t) = \frac{I_M}{2\pi x} G\left(t, \frac{L_M}{x}\right),$$

где: $F(vt/x, L_M/x)$ и $G(t, L_M/x)$ - нормированные функции, описывающие изменение во времени напряженности электрического и магнитного полей грозового разряда в зависимости от влияющих факторов (рис. 2.26).

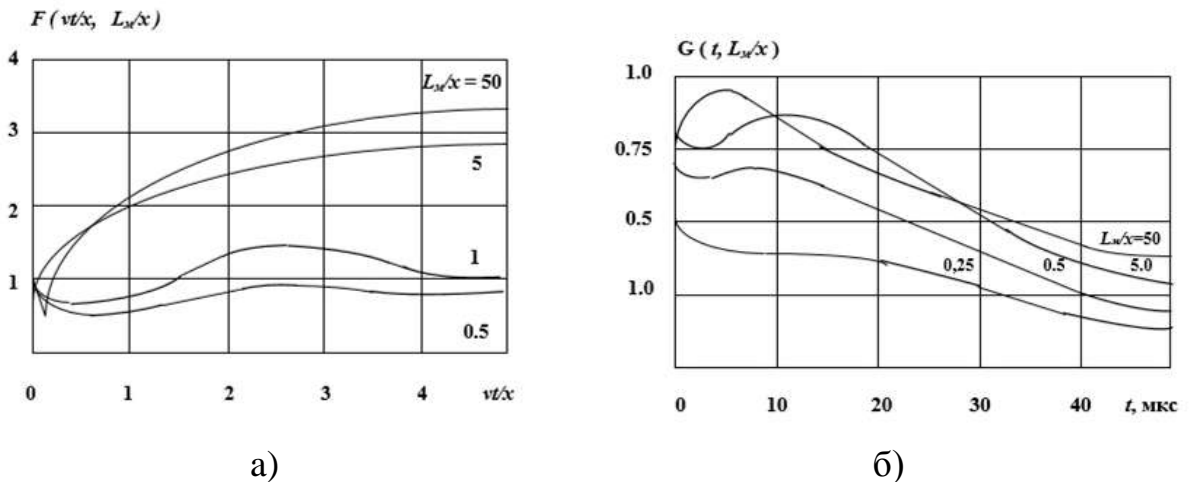


Рис. 2.26 - Нормированные функции временного изменения напряженности вертикального электрического (а) и магнитного (б) полей у поверхности земли [2.1].

Анализ формы импульсов напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых разрядом молнии “облако - земля”

указывает на сложность их структуры (рис. 2.18 - 2.20). В их составе можно выделить импульсы с существенно различными амплитудными параметрами и временными характеристиками. На рис. 2.27 приведены компоненты напряженности импульсного электрического и магнитного поля грозового разряда для расстояния 100 м от канала молнии при $I_M = 20$ кА.

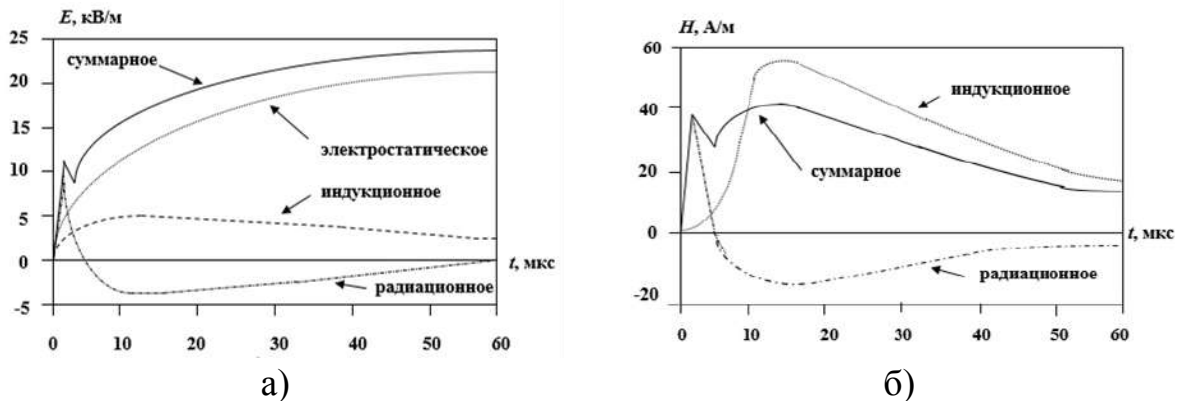


Рис. 2.27 - Компоненты напряженности импульсного электрического (а) и магнитного (б) полей грозового разряда и их суммарные значения у поверхности земли для расстояния 100 м от канала разряда молнии при $I_M = 20$ кА [2.6].

В [2.1, 2.72] впервые было предложено вместо традиционно принятого ранее представления электрического поля излучения молнии в виде электростатической, индукционной и радиационной составляющих, и магнитного поля в виде магнитостатической и радиационной составляющих [2.4, 2.6, 2.40] использовать более удобные формы представления для оценок восприимчивости ТС к грозovým воздействиям и воспроизведения (моделирования) испытательных грозových электромагнитных полей.

На рис. 2.28 дана иллюстрация представления электромагнитного поля излучения молнии в ближней зоне в виде быстроизменяющейся компоненты - грозового электромагнитного импульса (ГЭМИ) и импульсов электрического (ГИЭП) и магнитного (ГИМП) полей, имеющих меньшую скорость изменения во времени.

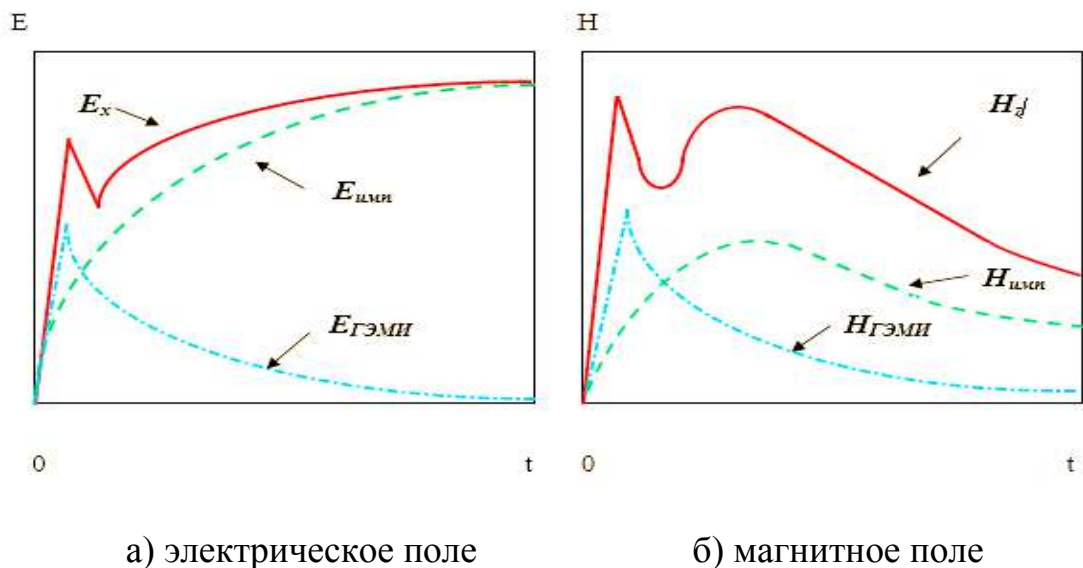


Рис. 2.28 - К обоснованию представления составляющих грозового электрического и магнитного полей

Исследование структуры электромагнитного поля излучения канала молнии в ближней зоне показали, что этим импульсам присущ ряд характерных черт [2.1, 2.72]:

- временные характеристики импульсных компонент напряженностей электрических и магнитных полей практически не изменяются с расстоянием, не смотря на изменения их общей формы;

- амплитудные параметры импульсных компонент напряженностей электрических и магнитных полей изменяются с расстоянием по различным законам (рис. 2.29), что и ведет к изменению их общей формы (в частности, амплитуда ГЭМИ изменяется обратно пропорционально расстоянию; амплитуда ГИЭП на расстоянии до 1 км от канала также меняется обратно пропорционально расстоянию, а начиная с 3 км и далее изменяется по закону обратной пропорциональности кубу расстояния; изменение амплитуды ГИМП находится в прямом соответствии с законом полного тока);

- отношение амплитуд напряженности электрического и магнитного полей ГЭМИ постоянно и близко к значению 377 Ом ($E/H=120\pi$ Ом), что совместно с уменьшением амплитуды обратно пропорционально расстоянию указывает на соответствие полей ГЭМИ свойствам, присущим плоской электромагнитной волне.

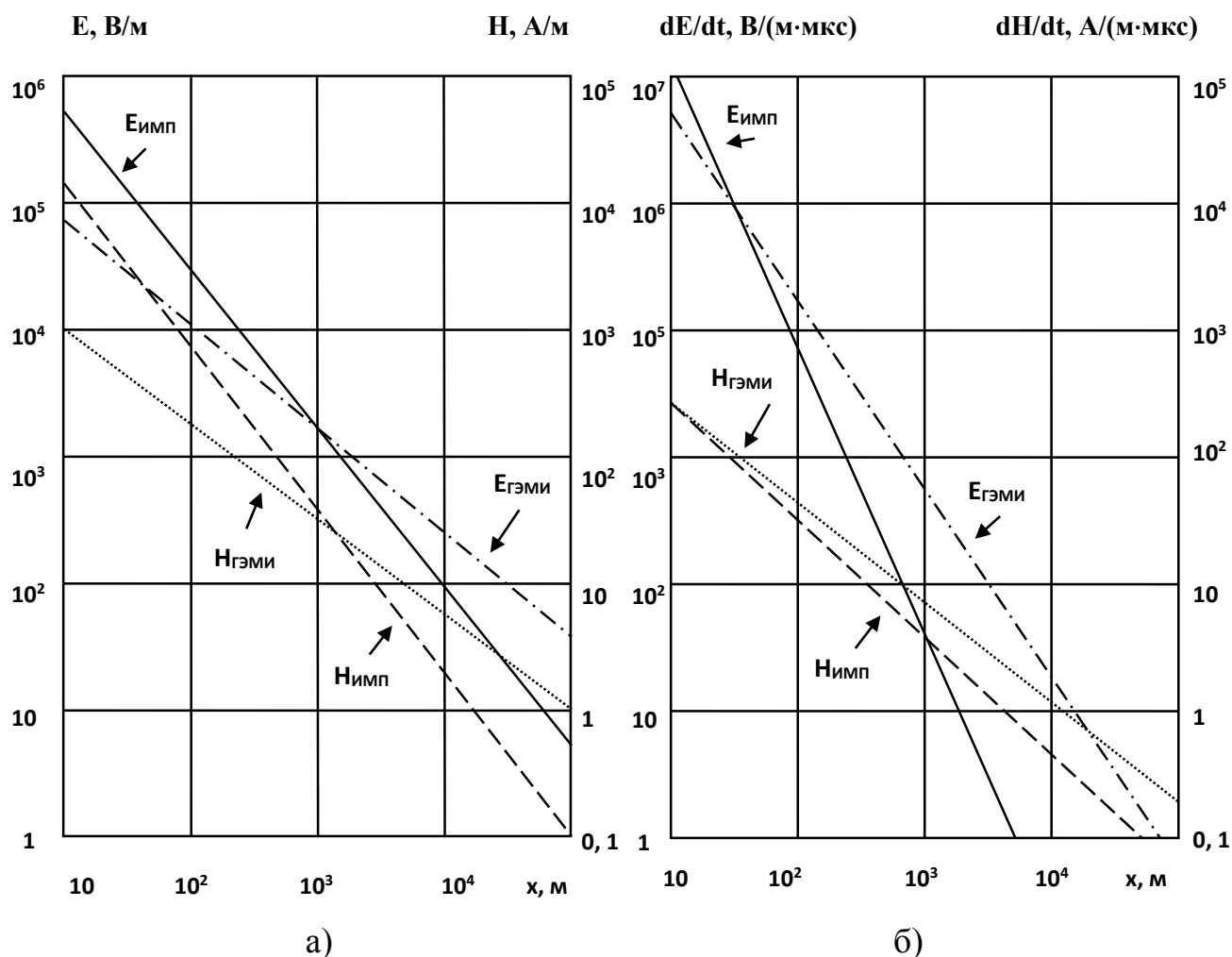


Рис. 2.29 - Изменение составляющих напряженности грозового электрического и магнитного полей и их производных по времени от расстояния.

Несмотря на то, что для большинства рассматриваемых расстояний, амплитуда импульсных компонент электрического и магнитного полей превышает амплитуды ГЭМИ (рисунок 2.29 а), уровень дестабилизирующего влияния на ТС полей ГЭМИ на малых расстояниях до канала разряда по сравнению с влиянием ГИЭП и ГИМП будет существенно превалировать.

Как показывают исследования [2.8, 2.9] уровень этого влияния на цепи радио- и электротехнического оборудования в основном зависит не от максимальных значений, а от скорости изменения во времени (dE/dt и dH/dt) воздействующих факторов электромагнитного поля. Так как закон изменения этих параметров с расстоянием (рисунок 2.29 б) существенно отличается от характера

изменения максимальных значений напряженности электромагнитных полей молнии (рисунок 2.29 а) при определении ВВФ ЭМП грозовых разрядов в качестве поражающих и дестабилизирующих факторов необходимо с одной стороны, из-за больших скоростей изменения, учитывать поля ГЭМИ, а с другой стороны, из-за значительных амплитуд - импульсные электрические и магнитный поля молнии.

Для практического решения инженерных задач обеспечения требований электромагнитной стойкости ТС к поражающему воздействию грозовых разрядов в [2.71, 2.72] приводятся упрощенные аналитические выражения, которые в первом приближении с погрешностью не более 15 % описывают временные изменения импульсных электрических и магнитных полей, а также полей ГЭМИ, формируемых разрядом молнии у поверхности земли в ближней зоне излучения:

- для вертикальной составляющей импульсного электрического поля:

$$E_y^{ИМП}(x,t) = \frac{60i_M(t)}{\beta x} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(vt/x)^2 + 1}} \right], \quad (2.28)$$

- для импульсного магнитного поля:

$$H_z^{ИМП}(x,t) = \frac{i_M(t)L_M}{2\pi\sqrt{L_M^2 + x^2}}, \quad (2.29)$$

- для полей ГЭМИ:

$$E_y^{\GammaЭМИ}(x,t) = \frac{60i(t)\beta}{x\sqrt{[(vt/x)^2 + 1]}}; \quad H_z^{\GammaЭМИ}(x,t) = \frac{i_M(t)\beta}{2\pi x\sqrt{[(vt/x)^2 + 1]}}, \quad (2.30)$$

- для горизонтальной составляющей электрического поля на поверхности земли:

$$E_x^{ИМП}(x,t) = \frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_3 x^2} + \frac{\sqrt{\mu_0 t}}{\pi^3 \sigma_3 x^2} \frac{di_M(t)}{dt}, \quad (2.31)$$

где $i_M(t)$ - ток молнии в канале разряда; v - скорость обратного разряда; c - скорость света; $\beta = v/c$; σ_3 - удельная электропроводность земли (все величины измеряются в единицах СИ).

Довольно часто, особенно в тех случаях, когда встает вопрос о воспроизведении или имитировании поражающих факторов грозových электромагнитных полей с помощью высоковольтных импульсных установок, работающих по принципу разряда емкости через индуктивность на активную нагрузку, изменение этих факторов во времени удобно описывать в виде биэкспоненциальной функции.

В табл. 2.2 приведены основные параметры для такого вида аппроксимаций.

Опыт обеспечения требований молниестойкости ТС показал удобство и допустимость возможности в использовании приведенных упрощенных аналитических выражений в инженерной практике [2.1].

Таблица 2.2 - Усредненные параметры ГЭМО ближней зоны излучения молнии “облако-земля” [2.1]

Аппроксимация	Расстояние	Амплитудно-временные характеристики			
		Напряженность поля		$\alpha, \text{с}^{-1}$	$\beta, \text{с}^{-1}$
		Е, В/м	Н, А/м	α_1 α_2	β_1 β_2
$E(t) = E_{\max}(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$	$x \leq L_M$	$E_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{x}$	$H_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{3 \cdot 10^3}{x}$	$\frac{70}{3,2 \cdot 10^4}$	$\frac{1,4 \cdot 10^4}{1,6 \cdot 10^6}$
	$H(t) = H_{\max}(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})$	$3L_M \geq x > L_M$	$E_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{12 \cdot 10^6}{x}$	$H_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{3 \cdot 10^3}{x}$	$\frac{7 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^7}$
$E_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{6 \cdot 10^6}{x^3}$			$H_{\max}^{\text{ГЭМО}} = \frac{10^7}{x^2}$	$\frac{70}{3,2 \cdot 10^4}$	$\frac{1,4 \cdot 10^4}{1,6 \cdot 10^6}$

2.2.5 Параметры электромагнитных полей облачных разрядов

Хотя исследования молнии облако-земля довольно многочисленны, о природе разрядов внутри облака, между облаками или между облаком и воздухом известно не так много. К тому же, наблюдаются значительные расхождения в параметрах облачного разряда, полученных различными авторами. В то время как разряды на землю характеризуются быстрым изменением поля, происходящим каждые 50 мс и продолжающимся порядка 1 мс, облачные разряды приводят к медленным, относительно гладким изменениям поля. Как облачные разряды, так и разряды облако-земля, имеют примерно одинаковую продолжительность и составляют обычно доли секунды. В среднем число таких разрядов колеблется от 5 до 20 за период времени 100 мс. Средний интервал между импульсами составляет 8,5 мс с длительностью 6 мс [2.6]. Качественные характеристики изменений поля, обусловленных облачными разрядами, впервые были рассмотрены Шоландом [2.12].

Было установлено [2.12], что разряды облачных молний сопровождается изменениями электрических и магнитных полей и радиоизлучением в диапазоне частот до 100 кГц, что необходимо учитывать при обеспечении требований электромагнитной совместимости радиотехнического оборудования летательных аппаратов.

При измерении электрических полей облачных разрядов выявлено, что эти поля делятся на медленные и быстрые. Медленные *отрицательные* изменения поля относятся к разрядам в воздухе или облачным разрядам, которые либо снижают положительный заряд облака, либо, что более вероятно, поднимают его отрицательный заряд. Медленные положительные изменения поля относятся к вспышкам, которые не достигают земли и, вероятно, включают движение вверх отрицательного заряда. При этом, приведена средняя продолжительность вспышки в 245 мс для отрицательных изменений поля и 145 мс для положительных изменений поля. Таким образом, медленные *положительные* изменения поля имеют меньшую продолжительность и встречаются реже, чем медленные отрицательные изменения поля [2.9].

Облачные разряды являются скорее горизонтальными, чем вертикальными. Если облачный разряд происходит между двумя центрами сферических зарядов, расположенными не вертикально, то необходимы 7 параметров для полного описания результирующего изменения поля. Эти параметры представляют собой по три пространственные координаты для каждого из зарядов и величину реализованного заряда. При вертикальном заряде необходимо только 5 параметров.

На рис. 2.30 приведена типичная осциллограмма изменения напряженности электрического поля облачного разряда молнии [2.6, 2.9].

Как следует из приведенной осциллограммы, начальная часть характеризуется пульсациями с относительно небольшой амплитудой и широкой областью интервалов между ними. Средний интервал между импульсами около 680 мкс. Продолжительность начальной части облачного разряда изменяется от 50 до 300 мс.

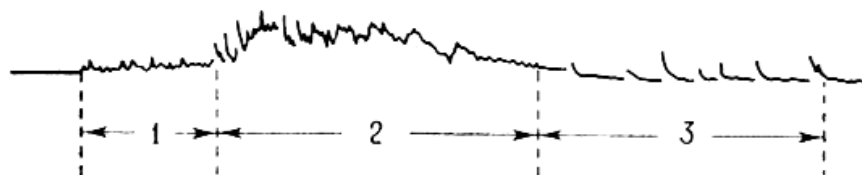


Рис. 2.30 – Типичная осциллограмма изменения электрического поля облачного разряда молнии полученная на антенну с большой постоянной времени [2.9].

- 1 – начальная часть (50 – 300 мс);
- 2 – очень активная часть (200 – 500 мс);
- 3 – часть слабых возвратных ударов (20 – 200 мс).

Таким образом, в этой части наблюдаются существенные различия между начальными стадиями облачного разряда и разряда облако - земля: интервал времени между импульсами в начальной части и продолжительность начальной части облачного разряда значительно больше, чем межимпульсный интервал ступенчатого лидера и его продолжительность.

Вторая, очень активная часть изменения поля облачного разряда, характеризуется сначала относительно быстрым изменением поля и соответствующими большими импульсами при изменении этой части электрического поля. Форма импульсов и интервалы между ними более нерегулярные. Изменения поля являются самыми большими для всего из наблюдаемого поля, и содержат много относительно быстрых изменений, соответствующих очень большим импульсам.

Последняя часть изменения поля облачного разряда содержит слабые возвратные удары и характеризуется серией малых быстрых изменений поля между спокойными интервалами длительностью от 2 до 20 мс. Разница между начальной и активной частями, однако, не всегда ясна, причем переход от одной части к другой обычно происходит более или менее постепенно [2.6].

Наблюдениями 1400 облачных разрядов установлено [2.6], что в среднем около 50% из них содержат все три ранее указанные части, 40% состояли из очень активной части и части слабых разрядов, у оставшихся 10% отсутствовала часть слабых разрядов и разряды состояли либо из начальной, либо из очень активной ее части, либо из обеих.

2.2.6 М-компоненты молний

Восходящая молния присуща объектам, высота которых больше 100 м. Каждая восходящая молния начинается как восходящий лидер, который может сопровождаться разрядом облако-земля (CG-flash). Среди всех типов молний восходящие положительные лидеры детально изучены, так как они очень часто появляются во время летних гроз с высотных сооружений. Гораздо меньше исследованы восходящие негативные лидеры, которые очень редки. Они проявляются при использовании ракетной технологии формирования молниевых разряда, особенно во время зимних гроз в Японии. Однако, современное понимание физических процессов, происходящих при распространении восходящих лидеров от высотных объектов очень ограничено, и состоит, в основном, из характеристик различных осциллограмм токов, полученных с оборудованных высоких башен и при исследовании коммутируемых ракетами молний (рис. 2.31).

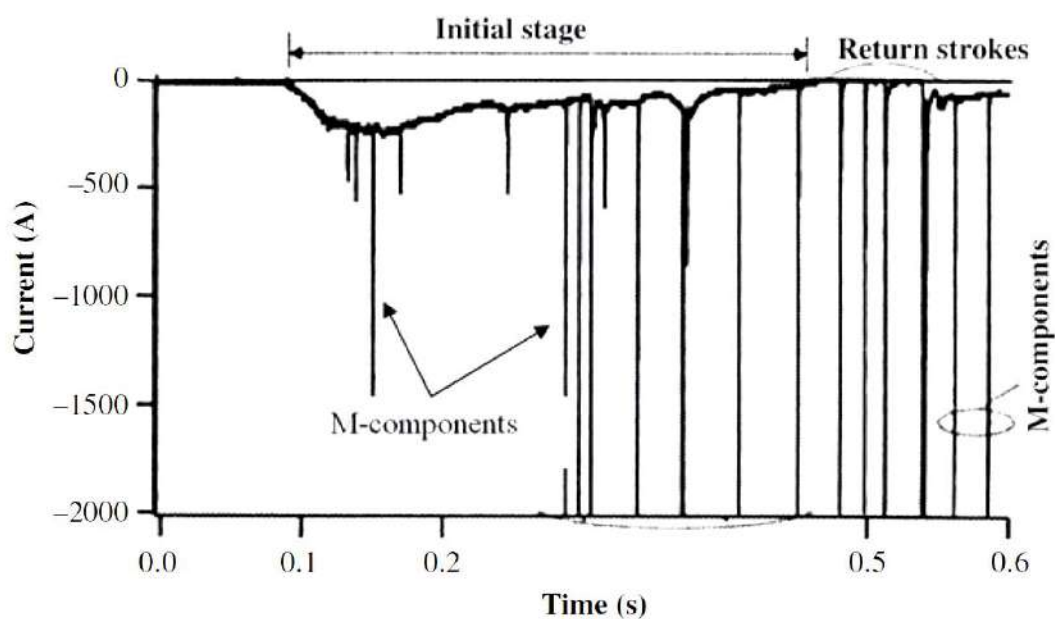


Рисунок 2.31 – Осциллограмма тока положительного восходящего лидера, сопровождаемого множественной молнией между облаком-землей [2.34]. Фаза положительного восходящего лидера идентифицирована как «initial stage». Она включает длительный ток с наложением импульсов тока М-компоненты. М-компоненты сопровождают также четвертый возвратный ток

М-компоненты похожи на незавершенные лидерные процессы. Интересны те, которые предшествуют разряду. Из рисунка не понятно, чем М-компоненты в конце осциллограммы отличаются от возвратных токов слева.

В дополнение к светимости, которая медленно меняется, разветвленный вверх положительный лидер имеет импульсную вспышку с его электрической «подписью» (крюкообразное изменение напряженности электрического поля), что подходит для определения М-компоненты. Пример визуальной и электрической записи М-компоненты представлено на рис. 2.32 [2.34]. «Крюк» изменения напряженности (dE) М-события на рисунке показывает изменение в отрицательную сторону, что обусловлено приближением негативного лидера, с последующим присоединением его к токовому каналу, и дополнением нового положительного заряда (отмечено восходящим скачком на осциллограмме). Развитие восходящего лидера продолжается после присоединения, на что указывает тот же угол наклона вверх до и после события.

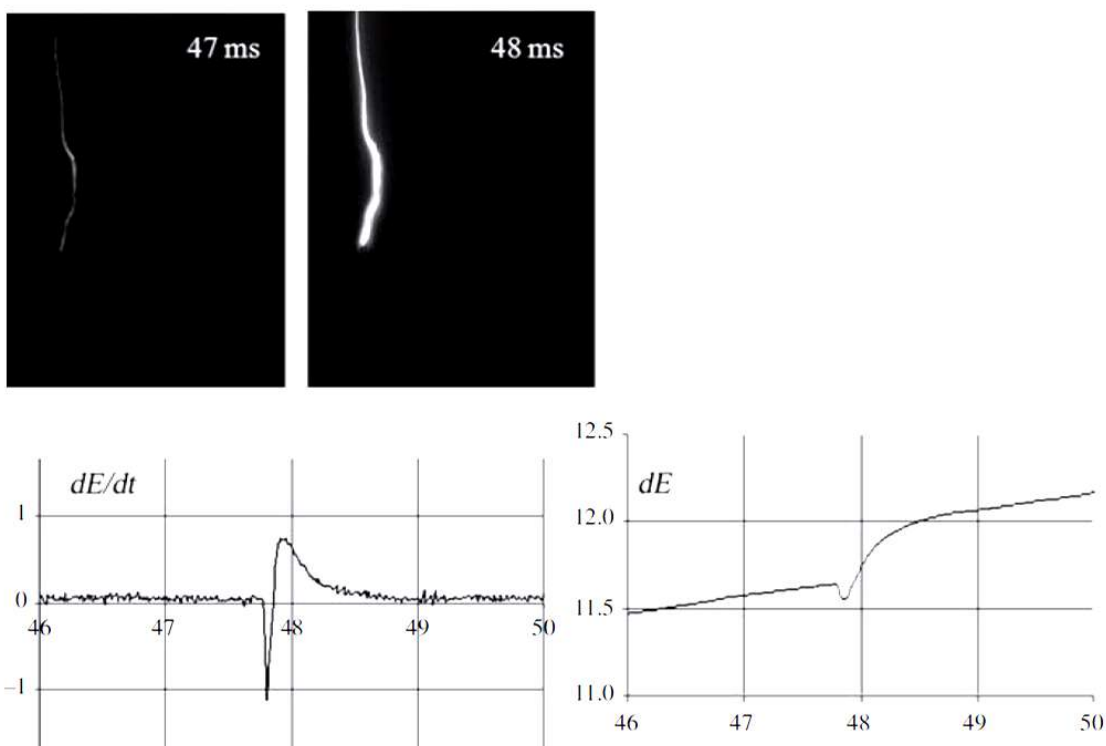


Рис. 2.32 - Импульсная светимость в положительном восходящем лидере от башни и изменение электрического поля, сопутствующего ему [2.34]

Вертикальные электрические поля возвратного удара на уровне земли, определены взятием интегралов Зоммерфельда (Sommerfeld) численным методом. Несколько таких примеров, соответствуют расстояниям между 10 м и 1 км от канала молнии для проводимости земли 0,01, и 0,001 См/м представлены Соогау [2.73, 2.74]. При вычислениях эффективная диэлектрическая проницаемость грунта была принята равной 5. Рассчитанные электрические поля и производные электрического поля на нескольких расстояниях от канала молнии показано на рис. 2.33 и 2.34, соответственно. В каждой диаграмме вертикальное электрическое поле, которое было бы на том же расстоянии над идеально проводящей землей, также показано пунктирной линией с целью сравнения. При вычислениях возвратный удар моделировался с использованием модели MTLE для высоты канала тока $\lambda_e = 2$ км. Скорость распространения возвратного тока принята постоянной $1,5 \cdot 10^8$ м/с. Форма волны тока на уровне земли смоделирована аналитическим выражением [2.34, формула (11.21)].

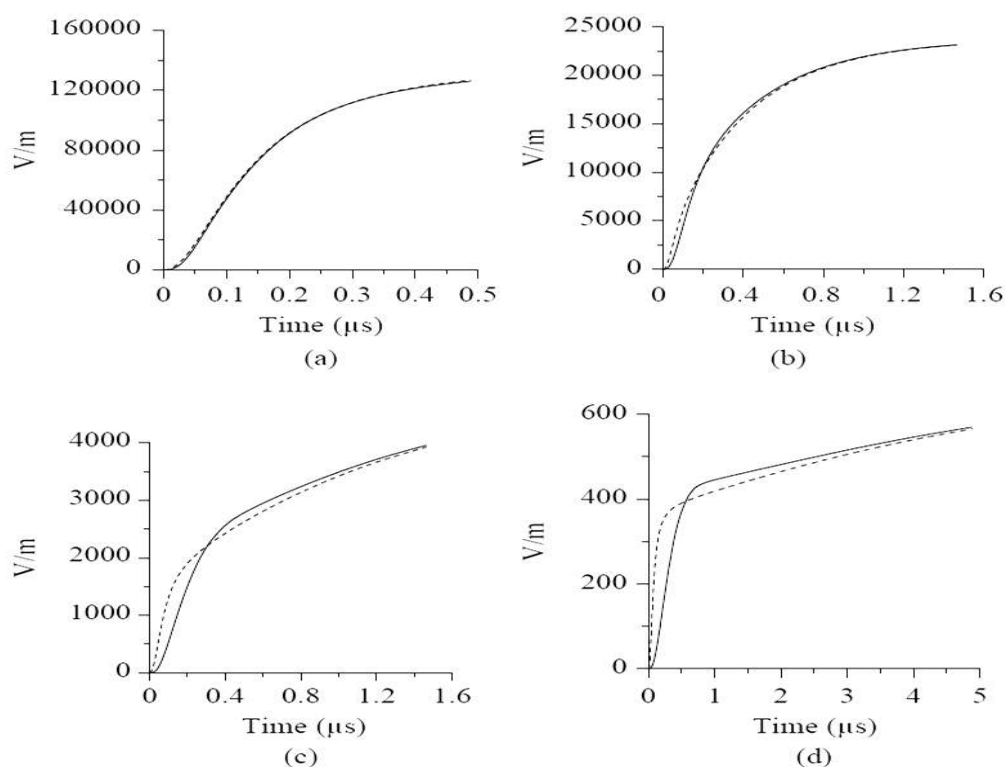


Рис. 2.33 - Вертикальное электрическое поле на уровне земли при: (a) 10 м, (b) 50 м, (c) 200 м и (d) 1000 м от канала молнии. Сплошная линия показывает напряженность над проводящей землей, а пунктирная линия показывает соответствующее поле над идеально проводящей землей.

Проводимость земли - 0,001 См/м; относительная диэлектрическая проницаемость - 5.

Результаты, представленные на рис. 2.33, показывают, что для вертикального электрического поля на рассматриваемых расстояниях, эффекты распространения не приведут к существенным изменениям, за исключением незначительного изменения в наклоне растущей части для расстояний от канала молнии в пределах до 1000 м и для проводимости большей, чем 0.001 См/м. Подобные выводы относительно несущественных эффектов распространения в электрическом поле вблизи канала молнии также приведены в работах Y. Baba и V. Rakov [2.75]. Важно отметить, что эффекты влияния земли при распространении полей на больших высотах несколько меньше, чем те, которые на уровне земли.

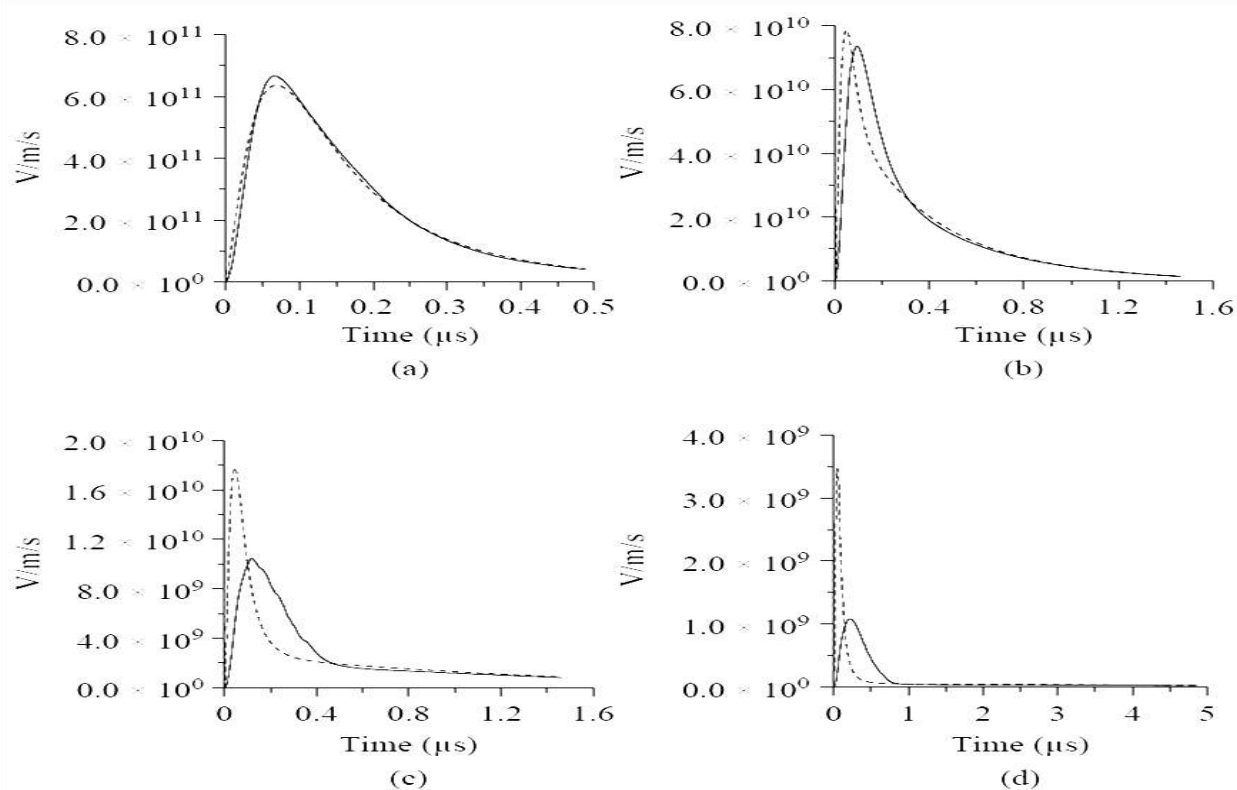


Рис. 2.34 - Производная по времени вертикального электрического поля на уровне земли при: (a) 10 м, (b) 50 м, (c) 200 м и (d) 1000 м от канала молнии. Сплошная линия показывает производную времени электрического поля над землей (с конкретным значением проводимости), а пунктирная линия показывает соответствующее поле над идеально проводящей землей (исходные данные аналогичны тем, что указаны к рисунку 2.33) [2.74]

Вычисления V. Cooray [2.74] показывают, что производная электрического поля значительно более чувствительна к эффектам распространения, и они могут быть значительно искажены

эффектами распространения даже в пределах 1 км от канала (Рис. 2.34).

Магнитные поля. Расчеты V. Cooray [2.34, 2.73] показывают, что аналогично электрическим полям, примерно в пределах 1 км от канала молнии, эффектами распространения на магнитные поля можно пренебречь. Для больших расстояний приблизительные выражения, могут обеспечить приемлемые результаты. Однако, это не факт для производной магнитного поля. Подобно производной времени электрического поля, производная времени магнитного поля также значительно ослабляется даже в пределах 1 км от канала молнии. Рисунок 2.35 показывает, как пик производной по времени напряженности магнитного поля меняется с расстоянием над землей (с конкретным значением проводимости) для проводимости в диапазоне от 0.01 См/м до 0.0001 См/м. Поскольку временные характеристики производных времени магнитных и электрических полей почти идентичны вплоть до нескольких десятков метров от канала молнии, эффекты распространения на них также почти идентичны.

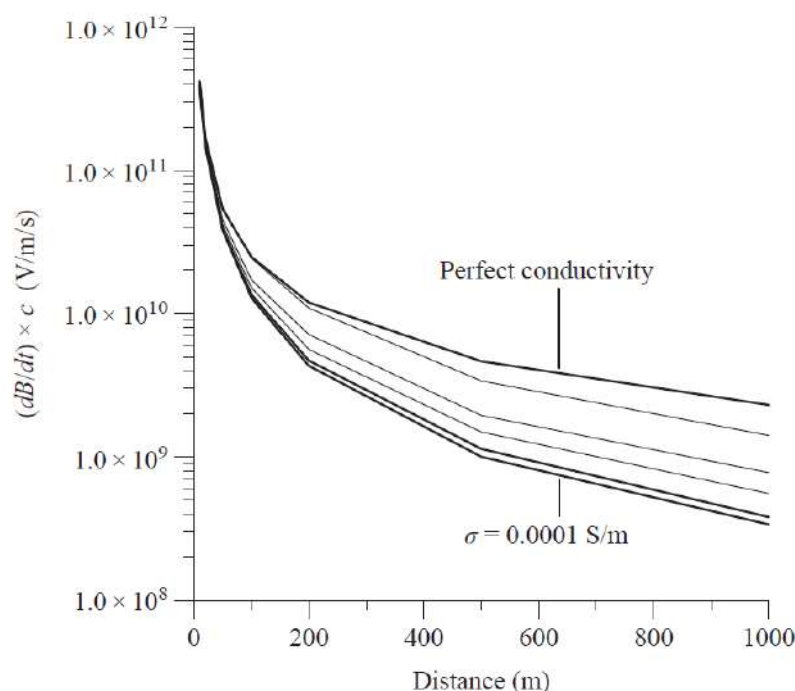


Рис. 2.35 – Значение максимума производной по времени напряженности магнитного поля умноженное на скорость света в свободном пространстве как функция расстояния для нескольких проводимостей грунта [2.34]. Результаты показаны для идеально проводящей земли, σ - 0,01; 0,001; 0,0005; 0,0002 и 0,0001 См / м. Остальные исходные данные аналогичны тем, что указаны к рисунку 2.33

Напряженность горизонтального электрического поле на уровне земли для $r = 100$ км, $\sigma = 0,01$ См/м представлено на рис. 2.36. Кривая (1) получена вычислением интегралов Зоммерфельда. Кривая (2) получена по выражению поверхностного импеданса с магнитным полем над идеально проводящей землей. Кривая (3) получена по выражению внешнего (поверхностного) импеданса с магнитным полем над проводящей землей [2.34, 2.76].

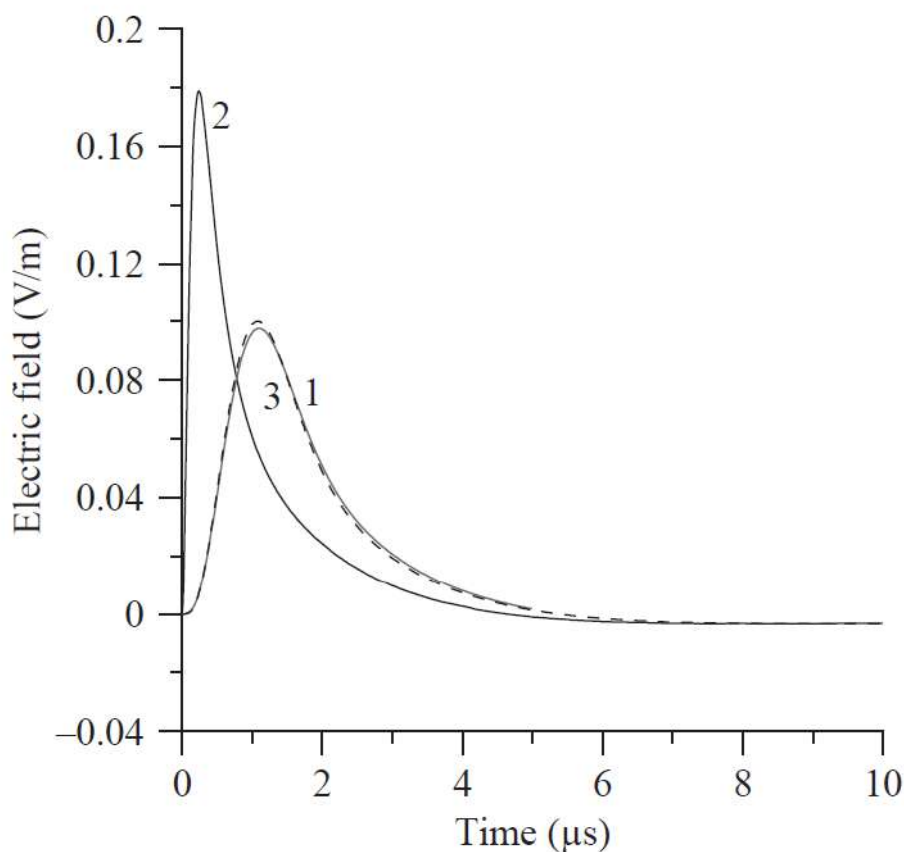


Рисунок 2.36 – Горизонтальное электрическое поле на уровне земли для $r = 100$ км, $\sigma = 0,01$ См/м [2.34]

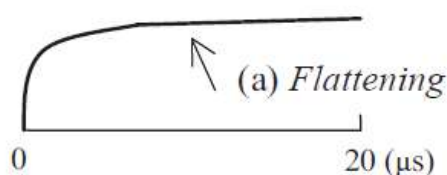
Подобные графики дают возможность по измеренным значениям напряженности вертикальной компоненты E и горизонтальной компоненты H на поверхности земли оценить дальность до канала молнии. Однако, точность такой оценки определить сложно, поскольку не учтен ряд эффектов, влияющих на результат.

2.2.7 Характерные особенности параметров электромагнитных полей молнии

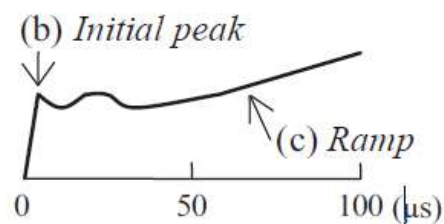
В работе [2.34], формы волны вертикального электрического и азимутального магнитного поля, вычисленные с использованием FDTD метода, сравниваются с типовыми измеренными формами волны электрического и магнитного полей, сопровождающих первый и последующие возвратные удары природной молнии на расстояниях $d = 5$ и 50 км, и инициированных ударов молнии на расстоянии $d = 50$ м. Следует отметить, что добиться хорошего совпадения результатов можно только в том случае, когда исходные данные в математической модели адекватны реальным характеристикам молнии, в том числе: параметры силы тока, длина канала, конфигурация канала молнии (линейной вертикальной бывает крайне редко), расстояния до точки измерения, отсутствие полей от других молнии и т.д. Однако, разработка расчетных методик, учитывающих максимальное число влияющих факторов, важна, поскольку факт удовлетворительного совпадения результатов позволит подтвердить адекватность модели, что обеспечит лучшее понимание реальных процессов.

В связи с этим, отметим следующие пять отличительных признаков, показанных на рисунке 2.37 [2.34], в формах волны электрического и магнитного поля в зависимости от расстояния до канала молнии.

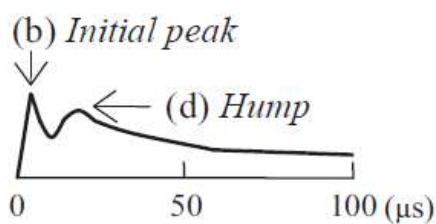
E-field at $d = 50$ m



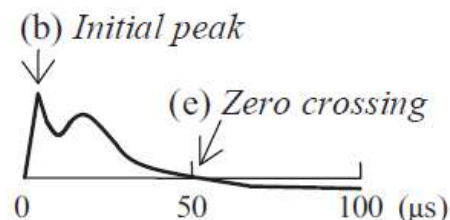
E-field at $d = 5$ km



H-field at $d = 5$ km



E-field at $d = 50$ km



H-field at $d = 50$ km

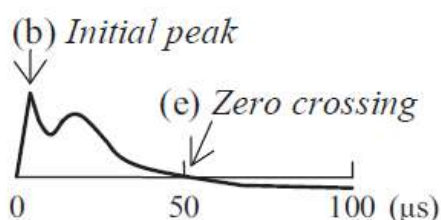


Рисунок 2.37 – Характерные особенности формы волны вертикального электрического и азимутального магнитного полей, измеренных на разных расстояниях от канала молнии [2.34]

Эти особенности могут быть использованы в качестве эталона при определении адекватности различных математических моделей возвратного удара молнии [2.34]:

(A) характерно нарастание напряженности вертикального электрического поля (на расстоянии от десятков до сотен метров) в пределах 15 мкс от начала возвратного удара;

(B) крутой начальный пик формы волны электрического и магнитного полей в нескольких километрах и далее;

(C) медленный спад, следующего за начальным пиком, в формах волны электрического поля, измеренного в пределах нескольких десятков километров;

(D) максимум (округлая выпуклость), следующего за начальным пиком в формах волны магнитного поля, измеренного в пределах нескольких десятков километров;

(E) точка пересечения нуля в пределах десятков микросекунд для формы волны как электрического, так и магнитного поля, измеренная в 50 км и дальше.

Обобщение большого числа результатов измерения амплитудно-временных параметров (формы) электрического поля на различных расстояниях от канала молнии проведено методом статистической обработки в работах авторов Adonis F.R. Leal и Vladimir A. Rakov [2.60, 2.61]. Указанные статьи к моменту выхода книги еще не опубликованы, поэтому не имеют выходных данных, однако приняты к публикации в 2021 году. Следует отметить, что статьи нам любезно предоставлены A.F.R. Leal, за что авторы выражают ему свою благодарность. Представленные в этих статьях материалы важны для более полного сравнения результатов математического моделирования с реальными процессами, поскольку основаны на обработке объективной первичной информации. Кроме того, в результате усреднения большого объема данных, фактически достигнут эффект вертикального канала молнии. Учитывая особую ценность, далее материалы статей цитируются достаточно полно.

Рассмотренная в статьях база данных включает широкополосные формы сигналов электрического поля, создаваемые отрицательными вспышками CG, из которых 3945 являются первыми ударами, а 3097 - последующими ударами, которые произошли в результате более чем 20 гроз во Флориде в августе 2016 года. Формы сигналов электрического поля были зарегистрированы в обсерватории молний в Гейнсвилле (Lightning Observatory in Gainesville - LOG) с использованием системы обнаружения молний и хранения формы сигналов (Lightning Detection and Waveform Storage System - LDWSS).

Общий набор данных разделен на четыре подмножества (1-первое-дневное время, 2-последующее-дневное время, 3-первое-ночное время, 4-последующее-ночное время). Во-первых, разделили события, произошедшие днем (с 06:00 до 18:59 по местному времени) и в ночное время (с 19:00 до 05:59 по местному времени). Затем в каждой из этих двух категорий определили первый и последующие разряды. Кроме того, каждый из этих четырех подмножеств данных разделен на 12 диапазонов расстояний: 10–20, 20–50, 50–75, 75–100, 100–150, 150–200, 200–250, 250–300, 300–350, 350–400, 400–450 и 450–500 км. В результате получено в общей

сложности 48 групп сигналов, которые исследованы индивидуально, а затем проведено сравнение друг с другом.

Чтобы усреднить формы RS-сигналов молний в базе данных, использовано фиксированное временное окно и нормированные по амплитуде формы сигналов, так что начальный пик волны равен единице. Временное окно установлено от -100 мкс до 500 мкс ($t = 0$ соответствует пику волны обратного удара).

На рисунке 2.38 представлена схема процесса усреднения, используемого для получения репрезентативной формы волны электрического поля для отрицательных первых обратных разрядов, зарегистрированных в дневное время в диапазоне расстояний 20–50 км. Серые кружки представляют собой величины отдельных синхронизированных по времени и нормированных по амплитуде сигналов в разные моменты времени, измеренные относительно пика земной волны на уровне земли, а черные кружки показывают средние арифметические (AM) для каждого из этих моментов времени.

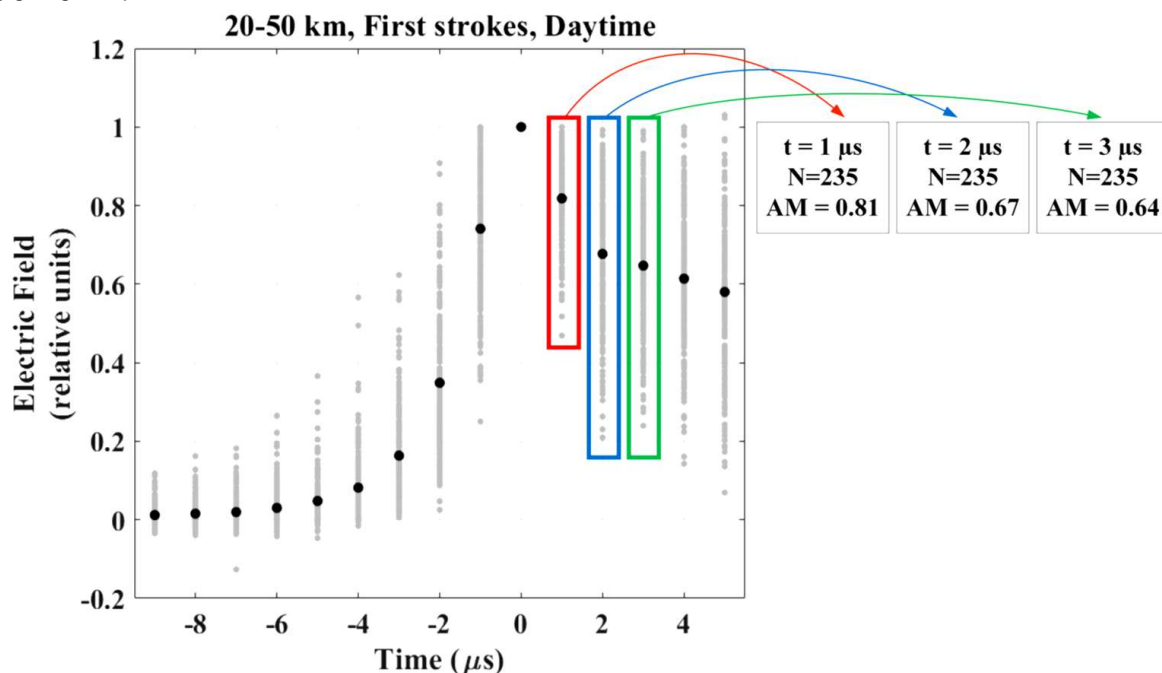


Рисунок 2.38 - Иллюстрация процесса усреднения, используемого для получения репрезентативной формы волны электрического поля [2.60]

На рис. 2.39 [2.60] показана блок-схема, иллюстрирующая методологию, которая использована для нахождения репрезентативной формы волны электрического поля для каждой из 48 групп рассмотренных событий.

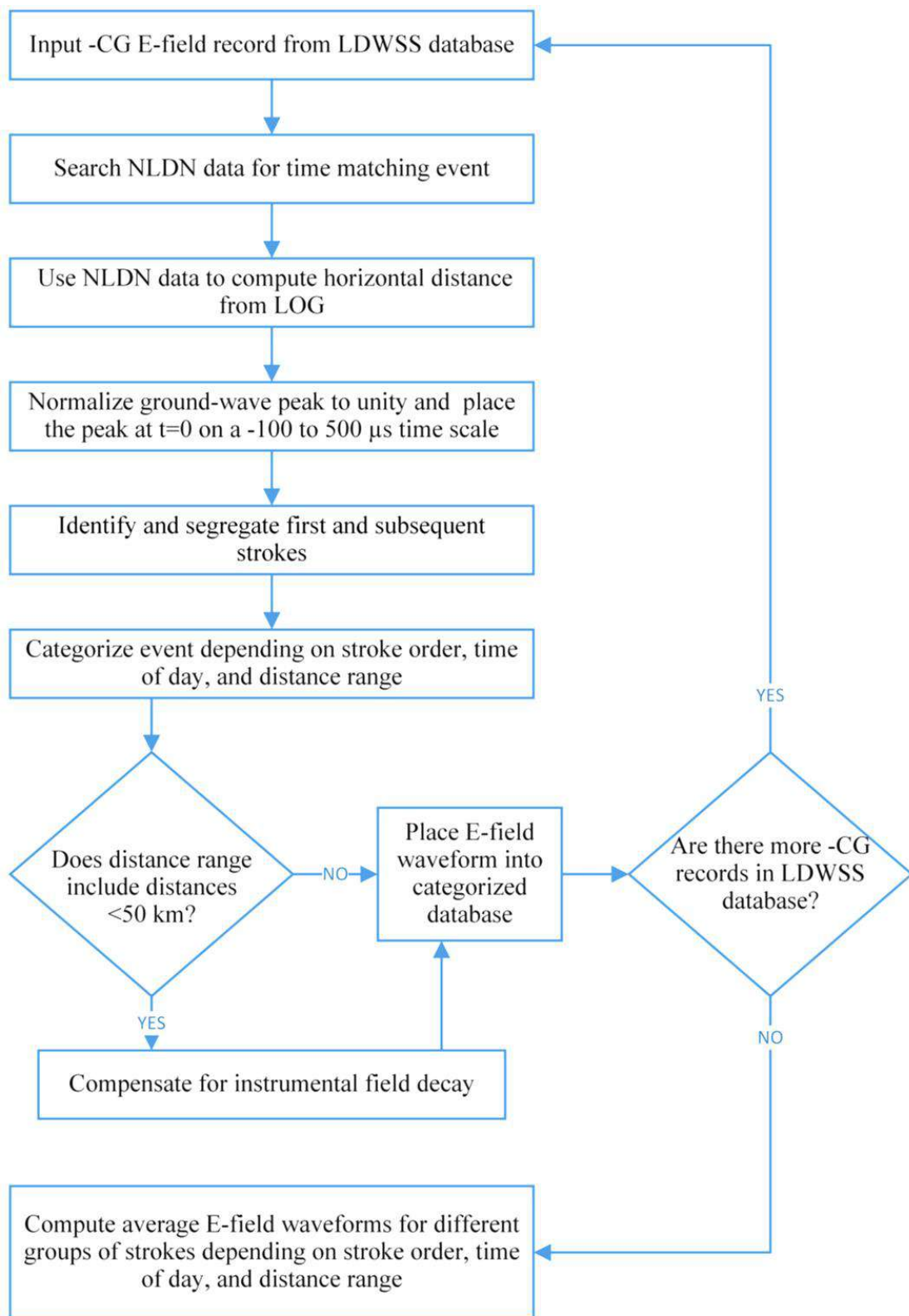


Рис. 2.39 - Блок-схема, иллюстрирующая процедуру, используемую для получения репрезентативных форм волн электрического поля – CG для различных групп разрядов [2.60]

При обработке результатов проведена компенсация инструментального затухания ($\tau = 1$ мс) в зарегистрированных формах сигналов электрического поля, примененная к характерным формам сигналов для диапазона расстояний 10–20 км, как показано на рисунке 2.40 [2.60].

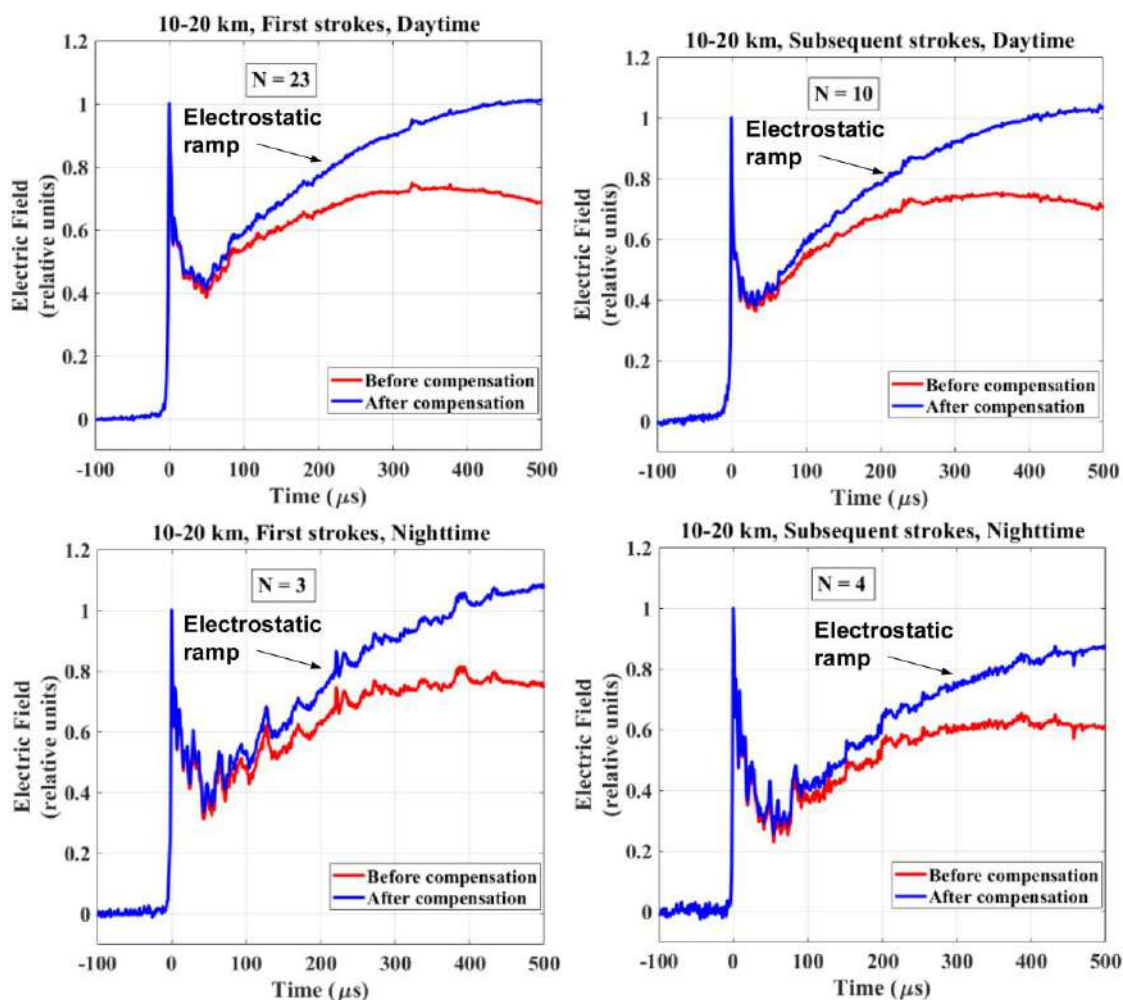


Рис. 2.40 - Иллюстрация компенсации инструментального затухания ($\tau = 1$ мс) в зарегистрированных формах сигналов электрического поля [2.60]

Процесс усреднения сигналов электрического поля основан на нахождении среднего арифметического (АМ) величин электрического поля для различных моментов времени относительно пика волны. Рисунок 2.38 иллюстрирует этот процесс для 235 осциллограмм первых ударов, зарегистрированных в дневное время в диапазоне расстояний 20–50 км. Примеры характерных форм сигналов показаны на рисунках 2.40–2.41. На рисунке 2.41 показаны результаты усреднения вместе с отдельными

формами волн для диапазона 20–50 км в двух различных временных масштабах.

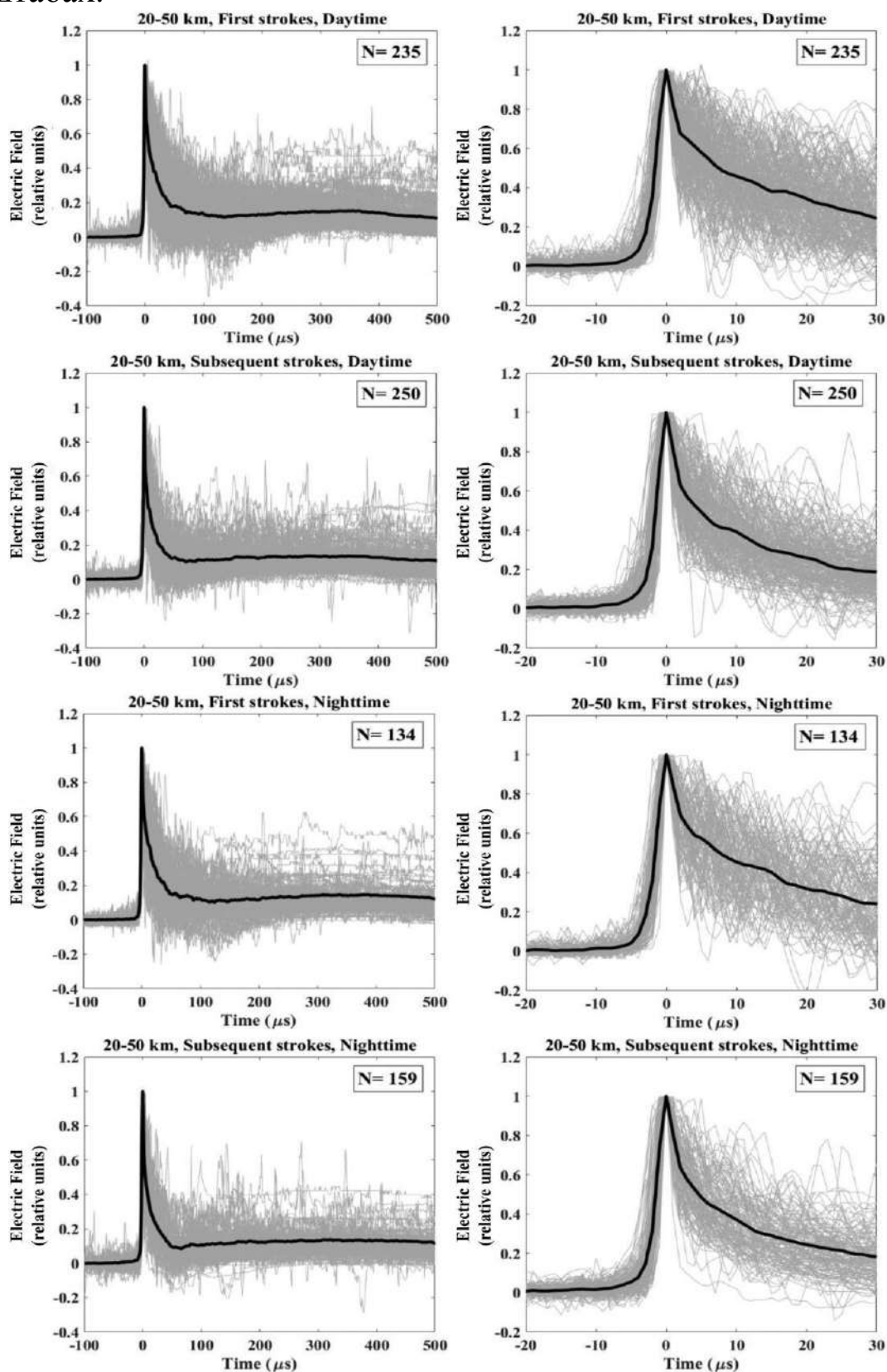


Рис. 2.41. Индивидуальные (тонкие серые линии) и усредненные репрезентативные (толстые черные линии) формы сигналов электрического поля молнии для диапазона 20–50 км,

Индивидуальные (тонкие серые линии) и усредненные репрезентативные (толстые черные линии) формы сигналов электрического поля молнии для диапазона 20–50 км, показанные на отрезках от –100 до 500 мкс (левый столбец) и от –20 до 30 мкс (правый столбец) шкалы времени. Строки на рисунке 2.41 представляют (сверху вниз) первые разряды в дневное время, последующие разряды в дневное время, первые разряды в ночное время и последующие разряды в ночное время.

В таблице 2.3 представлено количество событий в различных диапазонах расстояний по горизонтали, соответствующий минимум (min), максимум (max), AM и GM пика электрического поля, нормированного на 100 км, и зарегистрированные пиковые токи NLDN. Кроме того, приведены коэффициенты определения (R^2) между расстоянием и начальным пиком электрического поля, нормированным на 100 км, и между расстоянием и пиковым током для каждого диапазона расстояний. Здесь объединены данные для первого и последующих ударов, а также для дневного и ночного времени.

Таблица 2.3 – Усредненные результаты обработки

Distance range	N	E-field peak at 100 km (V/m)					NLDN-reported peak current (kA)				
		Min	Max	AM	GM	$R^2 \times 100\%$	Min	Max	AM	GM	$R^2 \times 100\%$
10-20 km	40	1.26	14.8	6.5	5.3	22%	5	56	23.9	19.4	25%
20-50 km	778	2	26.1	7.2	6.4	2%	5	100	25.9	22.3	1%
50-75 km	773	3.75	15.9	8	7.7	8%	11	74	27.4	25.8	7%
75-100 km	944	3.8	18.8	10	9.8	3%	12	85	35.2	33.6	3%
100-150 km	1627	4.78	28.5	13	13	8%	17	97	47	44.9	9%
150-200 km	1259	5.93	30	17	16	9%	19	100	61.5	59.8	8%
200-250 km	593	7.8	31.4	19	18	3%	25	100	70.5	68.2	4%
250-300 km	368	9.23	32.1	20	19	0.02%	35	100	75.5	72.9	0.3%
300-350 km	267	11.7	28.8	18	17	2%	41	100	69.9	68.1	1%
350-400 km	140	13.4	26.9	18	18	3%	43	100	72.2	71.1	6%
400-450 km	166	14.8	26.9	19	19	3%	52	100	79.3	78.6	7%
450-500 km	87	16.9	32	20	20	1%	59	100	87.7	87.3	6%
10-500 km	7042	1.26	32.1	13	12	45%	5	100	49.5	43.8	53%

На рисунке 2.42 показаны гистограммы пиков E-поля волны, нормированные на расстояние до 100 км, и пиковые токи, сообщенные NLDN, для диапазона расстояний 20–50 км. Обе гистограммы показывают логнормальные распределения (обратите внимание, что горизонтальная шкала логарифмическая), ожидаемые

для любых параметров молнии. Здесь объединены данные для первого и последующих ударов, а также для дневного и ночного времени.

Для диапазона расстояний 20–50 км начальные пики среднего геометрического (GM) электрического поля, нормированные на 100 км, составляют 7,3 и 5,6 В/м для первого и последующего ударов, соответственно.

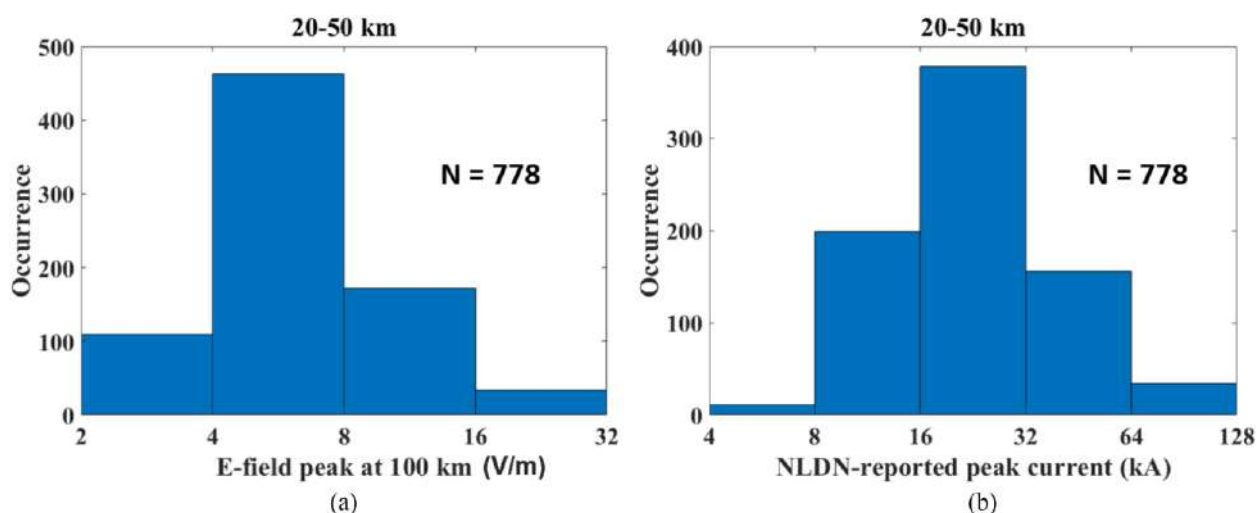


Рис. 2.42 - Гистограммы (а) пиков Е-поля волны, нормированные на расстояние 100 км, и (б) пиковых токов, сообщенных NLDN, для диапазона расстояний 20–50 км. Здесь объединены данные для первого и последующих штрихов, а также для дневного и ночного времени.

В работе [2.61] исследована зависимость параметров формы сигнала электрического поля молнии от расстояния между каналом молнии и точкой измерения поля. Анализ выполнен на основе характерных форм широкополосных сигналов электрического поля, которые были получены путем усреднения отдельных форм сигналов, образованных отрицательными обратными ударами на расстояниях от 10 до 500 км. Методология, используемая для поиска репрезентативных форм сигналов с использованием большой базы данных, описана выше. В статье [2.61] представлено результаты измерения в зависимости от расстояния следующих параметров формы волны: время нарастания от нуля до пика, время перехода через нуль, отношение первого пика электрического поля к пику противоположной полярности. Также представлено каталог типичных форм волн для разных расстояний, времени суток и порядка ударов.

Рисунок 2.43 иллюстрирует привязку обозначений к форме сигнала электрического поля.

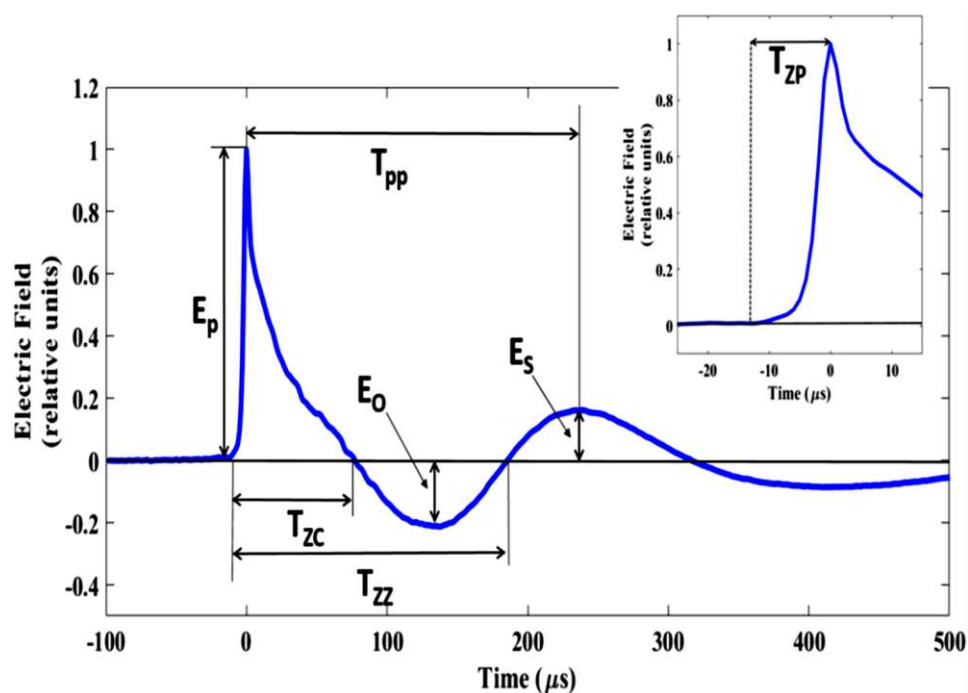


Рис. 2.43 - Определение параметров формы электрического поля [2.61]

На рисунке 2.44 представлен каталог усредненных (репрезентативных) форм сигналов электрического поля для первого (сплошная линия) и последующего (пунктирная линия) обратных ударов на дальностях 10–20 км, 20–50 км, 100–150 км, 200–250 км и 400 км. –450 км, показано на двух шкалах времени: от –100 до 500 мкс (левый столбец) и от –20 до 150 мкс (правый столбец). N - размер выборки, используемый для поиска каждой репрезентативной формы волны. FD означает первые разряды, записанные в дневных условиях, SD означает последующие разряды, записанные в дневных условиях, FN означает первые разряды, записанные в ночное время, а SN означает последующие разряды, записанные в ночное время.

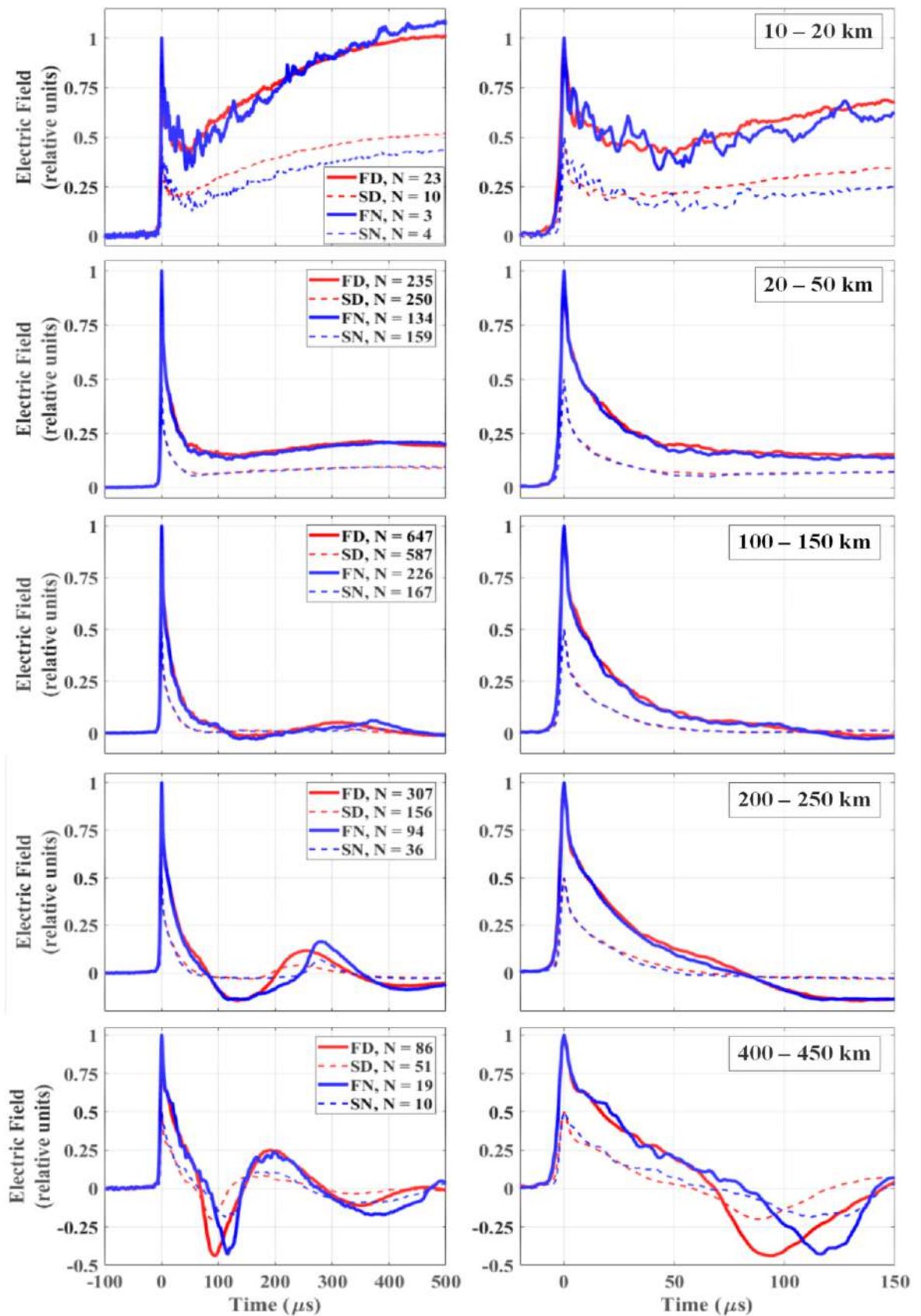


Рис. 2.44. Каталог усредненных форм сигналов электрического поля для первого (сплошная линия) и последующего (пунктирная линия) обратных ударов для различных диапазонов расстояний от канала молнии

Обобщенные средние арифметические значения (АМ) времен нарастания импульса от нуля до максимума для первого и последующих разрядов отрицательной нисходящей молнии, полученные разными группами исследователей, представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4– Среднее арифметическое (АМ) время нарастания импульса от нуля до максимума для первого и последующих разрядов отрицательной нисходящей молнии

Reference	Arithmetic mean (AM) of zero-to-peak rise time (T_{ZP}) in μ s	
	First strokes	Subsequent strokes
Present Study, Florida (10 - 500 km)	8.6	6.8
Present Study, Florida (10 - 350 km)	7.8	6.0
Haddad et al. [2], Florida (10 - 330 km)	7.7	5.0
Haddad et al. [2], Florida (50 - 330 km)	8.5	5.1
Pavlick et al. [6], Florida (50 - 250 km)	8.3	-
Lin et al. [1], Florida (about 200 km)	4.1	3.4
Lin et al. [1], Florida (about 50 km)	3.2	2.5
Lin et al. [1], KSC, Florida (within 15 km)	2.4	1.5
Lin et al. [1], Ocala, Florida (within 15 km)	2.7	1.9
Cooray and Lundquist [4], Sweden (unknown distances)	7.0	-
Wooi et al. [5], Malaysia (10-100 km)	6.6	3.0

Следует отметить, что время достижения максимума напряженности электрического поля хорошо коррелирует с аналогичным параметром для силы тока главного разряда молнии в диапазоне (8 -10 мкс).

2.3 Номенклатура и параметры внешних воздействующих факторов электромагнитного поля, сопровождающих грозовые разряды

Определение номенклатуры и параметров внешних воздействующих факторов электромагнитного поля (ВВФ ЭМП) грозовых разрядов является важнейшим этапом обеспечения электромагнитной стойкости ТС ЛА в условиях активной грозовой деятельности, так как без однозначного определения этих факторов невозможна практическая реализация основных аспектов концепции молниестойкости ТС ЛА:

- анализа восприимчивости радио- и электротехнического оборудования к поражающим воздействиям и дестабилизирующим влияниям грозовых разрядов (см. том 2);
- испытаний ЛА на молниестойкость (см. том 3).

При этом, именно параметры ВВФ ЭМП грозовых разрядов на близких (менее 100 м) расстояниях интересуют разработчиков радио- и электротехнического оборудования летательных аппаратов при обеспечении их молниестойкости. Грозовые поля дальней зоны излучения каналов молнии в этих случаях в основном необходимы для мониторинга грозовой электромагнитной обстановки.

К основным электромагнитным явлениям внешнего характера, связанными с грозовыми процессами, которые могут вызвать ограничение и потерю работоспособности ТС, как показано ранее, относятся :

- токи (напряжения) канала молнии;
- токи молнии в земле;
- электрические и магнитные (электромагнитные) поля молний, включая их предразрядный период и главные стадии.

На рисунке 2.25 приведена общая структурная схема, содержащая номенклатуру ВВФ ЭМП грозовых разрядов и основные виды их поражающего воздействия и дестабилизирующего влияния на ТС ЛА (прямой удар молнии или грозовое электромагнитное влияние).

Данная классификация объединяет ВВФ ЭМП как различных видов грозовых разрядов («облако – земля», и облачных разрядов), так и стадии их развития (предгрозовую, лидерную и главную).

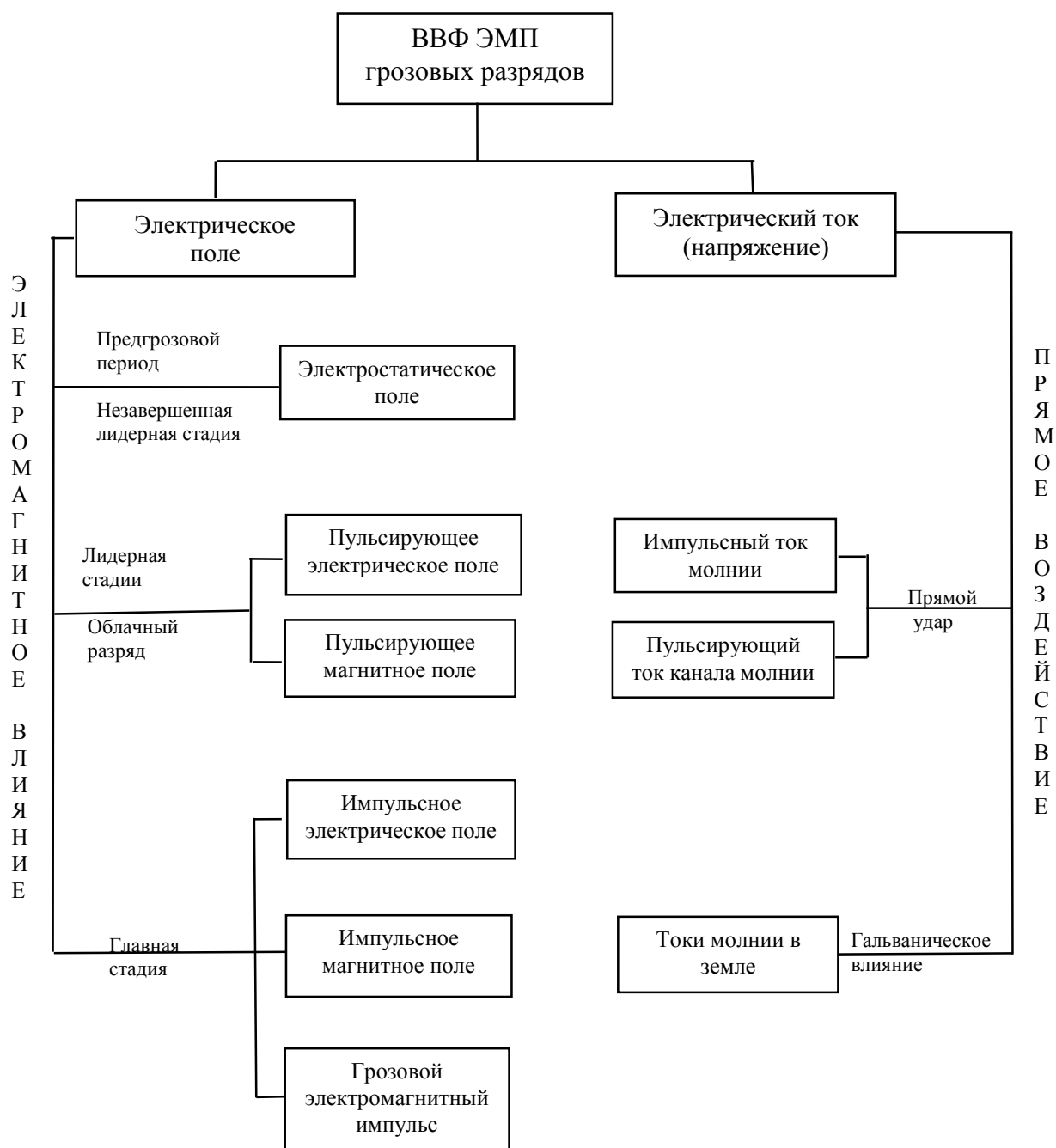


Рис. 2.45 - Номенклатура ВВФ ЭМП грозовых разрядов и виды их поражающего воздействия и дестабилизирующего влияния на ТС ЛА

Как следует из приведенной структурной схемы, ВВФ ЭМП грозовых разрядов состоят из двух групп: *электромагнитное поле* и *электрический ток (напряжение)*.

Первый вид группы "электромагнитное поле" объединяет в себе квазистационарные электрические поля предразрядного периода, а также предгрозовой и незавершенной лидерной стадии молнии. Эти электрические поля характеризуются средними значениями напряженностей до 100 кВ/м, изменение которых происходит со средней скоростью 10^5 кВ/м за секунду в течение 10 мс.

Второй вид этой группы включает в себя «нульсирующие электрические и магнитные поля», характерные для стадии прорастания ступенчатого лидера молнии «облако-земля» и облачных (межоблачных) разрядов. Эти поля представляют собой последовательность (пачку) импульсов электрического (магнитного) поля с периодом повторения 10...50 мкс и длительностью пачки до 1 мс. Каждый из единичных импульсов имеет длительность фронта в пределах от 0,1 до 0,5 мкс и длительность полуспада 20...50 мкс. Импульсные напряженности электрического (магнитного) поля имеют постоянную амплитуду, которая в среднем составляет 1/20 от амплитуды главного разряда молнии [2.2, 2.9, 2.15].

Импульсные электрические и магнитные поля главной стадии молнии, а также грозовой электромагнитный импульс представляют третий вид группы – «электромагнитное поле». По своим амплитудным параметрам и временным характеристиками это самые высокоинтенсивные и быстроизменяющиеся во времени ВВФ ЭМП этой группы.

Напряженность импульсного электрического поля в ближней зоне излучения молнии (50...100 м) достигает значений от 50 до 300 кВ/м при длительности фронта импульса $\tau_{\phi} = 20...100$ мкс и длительности полуспада импульса $\tau_u = 0,2...20$ мс.

Напряженность импульсного магнитного поля для этих расстояний может принимать значения от 50 до 300 А/м при $\tau_{\phi} = 1...4$ мкс и $\tau_u = 20...60$ мс.

Грозовой электромагнитный импульс представляет собой электромагнитное поле с амплитудными параметрами $E_{\max} = 15...100$ кВ/м, $H_{\max} = 40...265$ А/м и временными характеристиками $\tau_{\phi} = 0,04...0,2$ мкс и $\tau_u = 0,4... 2$ мкс, обладающее свойствами плоской электромагнитной волны, с $E/H = 120 \pi$ Ом.

Результаты анализа спектрального распределения МЭМП различных видов грозовых разрядов показывает [2.1, 2.2, 2.6, 2.71]:

- общие электромагнитные помехи преобладают в диапазоне частот ниже 30 кГц;

- разряды облачных молний сопровождается изменениями электрических и магнитных полей и радиоизлучением в диапазоне частот до 100 кГц;

- спектр импульсных электрических и магнитных полей достаточно широкий, но максимальное значение достигают составляющие в диапазоне от 2 до 30 кГц.

- спектр грозовых электромагнитных полей, связанных с полями излучения ГЭМИ в основном сосредоточен в диапазоне частот от 0,3 до 30 МГц.

Эти данные необходимо учитывать при обеспечении требований электромагнитной совместимости радиотехнического оборудования летательных аппаратов.

Вторая группа ВВФ ЭМП грозовых разрядов это «электрический ток (напряжение)». В нее входят следующие основные виды - ток канала молнии и токи молнии в земле.

Ток канала молнии как ВВФ ЭМП в зависимости от вида грозового разряда («облако-земля» или облачного) делятся на два подвида: импульсный ток молнии «облако-земля» и пульсирующий ток молнии облачного разряда [2.1, 2.2, 2.71].

Импульсный ток канала отрицательной молнии «облако-земля» характеризуется следующими параметрами [2.5]:

- амплитуда 20...200 кА;

- длительность фронта от 1,0 до 10 мкс;

- длительностью полуспада импульса 30...100 мкс.

Полный ток разряда молнии представляет собой либо однократный импульс, либо последовательность импульсов (как правило, это 2 или 3 импульса) в промежутке между которыми протекает сопровождающий ток 200...800 А. Амплитуда первого импульса, как правило, в два раза превышает амплитуду последующих импульсов тока. Временные характеристики первого импульса тока молнии в среднем в 1,5...2 раза больше чем у последующих импульсов.

Импульсный ток канала положительной молнии имеет следующие параметры [2.5]:

- амплитуда 2...350 кА;
- длительность фронта от 3,5 до 200 мкс;
- длительность полуспада импульса 2,5...2000 мкс.

Напряжения, как ВВФ ЭМП грозовых разрядов, связаны с протеканием токов молнии по объекту и зависят от величины этого тока и сопротивления заземления объекта. В среднем эти напряжения имеют величину $10^4...10^6$ В [2.5].

Пульсирующий ток молнии облачного разряда представляет собой последовательность импульсов амплитудой 1...10 кА, с периодом повторения 100 мкс и длительностью пачки импульсов до 2 мс. Каждый из единичных импульсов имеет длительность фронта 0,1...0,2 мкс и длительность полуспада до 4 мкс [2.1, 2.2, 2.71].

Вышеприведенные данные необходимо учитывать при обеспечении требований молниестойкости прежде всего диэлектрических обтекателей, фюзеляжей, шлейфовых антен, а также радиоэлектронного, электронного и электротехнического оборудования летательных аппаратов.

Токи молнии в земле составляют второй вид группы - электрический ток (напряжение). В качестве ВВФ ЭМП грозового разряда этот вид обусловлен появлением разностей потенциалов в земле и особенно на ее поверхности при растекании токов молнии от места удара в землю или от заземлителей молниеприемников. Потенциал на поверхности земли при растекании токов молнии в ее толще зависит от расстояния до места попадания этих токов в землю, величины тока молнии и электрофизических свойств грунта. В среднем на расстояниях до 100 м от места попадания тока молнии в землю величина электрического потенциала этой точки по сравнению с удаленными точками может принимать значения до сотен киловольт [2.2].

Данный вид ВВФ ЭМП необходимо учитывать при обеспечении молниестойкости стартовых комплексов объектов ракетно-космической техники и наземного оборудования обеспечения эксплуатации летательных аппаратов.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров электрических и магнитных полей, генерируемых молниевым разрядом, позволяет сделать следующие

выводы, важные с точки зрения формирования требований к системе локации разрядов и создание системы оперативного предупреждения о грозовой опасности.

Импульс тока нисходящей отрицательной молнии, соответствующий вероятности появления в 50% случаев, имеет следующие параметры [2.5]:

- амплитудное значение - 30 кА;
- время достижения максимума – 5,5 мкс;
- продолжительность на полуспаде импульса - 75 мкс.

Значение напряженности электрического поля у поверхности земли под грозовой тучей (предразрядный период) составит от 5 до 40 кВ / м.

Максимальные значения напряженности импульсного электрического поля главной стадии молнии в 30% случаев на порядок превышают соответствующие значения для предразрядной обстановки. В частности, скорость изменения напряженности электрического поля на расстоянии 10 м составляет $6,8 \cdot 10^{11}$ В/(м·с), а на расстоянии 200 м – $2 \cdot 10^{10}$ В/(м·с) при скорости обратного разряда $v = 10^7$ м / с и силе тока молнии 20 кА. Максимальные значения напряженности электрического поля составляют для расстояний 10 м - 200 кВ / м, а на расстоянии 200 м - 10 кВ/м. Результаты расчетов напряженности магнитного поля на этих расстояниях имеют значение: 170 А / м и 18 А / м, а скорости их изменения - 10^8 А/(мс) и $2 \cdot 10^7$ А/(м·с), соответственно.

Напряженность магнитного поля непосредственно вблизи канала молнии аналитически может быть определена с помощью формулы, вытекающей из закона полного тока.

Изменения максимальных значений напряженности электрического и магнитного полей главной стадии грозового разряда над поверхностью земли в зависимости от расстояния до канала молнии таковы:

- для расстояний от 1 до 4 км напряженность электрического поля практически не меняется с расстоянием и приобретает значение $E(\text{В/м}) \approx 0.2 I_m$ (где I_m - амплитуда тока в канале молнии, А), напряженность магнитного поля - $H \approx I_m / 2 \pi r$;

- для расстояний от 4 до 20 км напряженность электрического поля убывает по закону: $E(\text{В/м}) \approx 10^6 / r^3$ (r измеряется в км);

- на расстоянии более 30 км, когда преобладают поля излучения, зависимость напряженности электрического поля от расстояния имеет вид: $E(\text{В/м}) \approx 300/r$ (r измеряется в км).

Однако, и в этом случае результаты экспериментальных исследований, приведенных в [1.6], значительно отличаются от данных, опубликованных в [2.56]. Здесь, в частности, утверждается, что для ближних разрядов (0 - 10 км) изменение усредненных значений напряженности электрического поля от расстояния должна происходить по закону:

$$E(\text{В/м}) = 2046 \cdot r^{-1,375} (r, \text{ км}).$$

И только для дальних зон излучения молнии (более 50 км) практически все результаты теоретических и экспериментальных исследований как амплитудно-временных параметров электромагнитных полей излучения молнии, так и их формы, у большинства авторов совпадают.

Перемещение грозовой тучи над поверхностью земли в горизонтальном направлении происходит со средней скоростью 40 км/ч. Если учесть, что изменение напряженности электрического поля составляет $\Delta E_I = 10$ кВ/м на расстоянии 2 км, тогда $|\Delta E/\Delta t|_{\text{ср}} \approx 50$ В/(м·с).

Иные значения параметров применительно к военной технике представлены в стандарте [2.77].

В общем случае, напряженности вертикального электрического и магнитного полей у поверхности земли, как наиболее вероятные факторы для построения системы мониторинга и локальной системы предупреждения, могут быть представлены в таком упрощенном виде:

- временные характеристики импульсных компонент напряженностей электрических и магнитных полей меняются с расстоянием, с изменением их общей формы;

- амплитудные параметры импульсных компонент напряженностей электрических и магнитных полей изменяются с расстоянием по разным законам (рис. 2.44), что и ведет к изменению их общей формы (в частности, амплитуда ГЭМИ меняется обратно пропорционально расстоянию; амплитуда ГИЭП на расстоянии до 1 км от канала также меняется обратно пропорционально расстоянию, а начиная с 3 км и дальше, изменяется по закону обратной пропорциональности кубу расстояния, изменение

амплитуды ГИМП находится в прямом соответствии с законом полного тока);

- отношение амплитуд напряженности электрического и магнитного полей ГЭМИ является постоянным и близким к значению 377 Ом ($E/H=120\pi \text{ Ом}$), что совместно с уменьшением амплитуды обратно пропорционально расстоянию указывает на соответствие полей ГЭМИ свойствам, которые характерны плоской электромагнитной волне.

Представленные обобщенные качественные и количественные характеристики электромагнитных процессов, сопровождающих молниевые разряды, позволяют разработать начальные требования для локальной системы предупреждения о грозовую опасность.

Литература к главе 2

- 2.1. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. - М.: Радио и связь, 1991. - 264 с.
- 2.2. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292 с.
- 2.3. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. - М.: Гидрометеиздат, 1978.- 223 с.
- 2.4 Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем. / И.П.Кужекина; Под ред. Б.К.Максимова.- М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 2.5 SAE ARP 5412A:2005. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms.-56 p.
- 2.6 Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ/ М.С. Александров, З.М. Бекленева, Н.Д. Гладштейн и др.//- М.: Наука, 1972. -196 с.
- 2.7 Cooray V., Scuka V. EMP-Radiation from Lightning and its Effects on Digital Communication Equipment. // Proc. 18-th ICLP .-1985 p.259-263.
- 2.8 ДСТУ 2793 - 94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до потужних електромагнітних завад. Загальні положення. – введ. 01.01.96. Київ: Держстандарт України, 1994 - 15 с.
- 2.9 Uman M. The lightning discharge. Academic, London.-1987.-391 p.
- 2.10 Sing P., Verman T.S., Varshneya N.S. Effect of Corona on Ground Electric Field Beneath a Thundercloud// Indian Journal of Radio and Space Physics, 1985, Vol 14 P 126-130.
- 2.11 Uman M.A., Krider E.P. A Review of Natural Lightning: Experimental Data and Modeling// IEEE Trans. EMC. - 1982. - Vol - 24, - N 2.- P.79-111.
- 2.12. Шонланд Б. Полет молнии: Пер. с англ. Н.М. Имянитова. - М.: Гидрометеиздат, 1970. -160с.
- 2.13. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Lightning Electromagnetics // Working Group C4.40 August 2013 – 118 p.
- 2.14. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. – М.: Физматлит, 2001, - 320 с.
- 2.15. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество: Пер. с англ.-Л.: Гидрометеиздат, 1974. -418с.
- 2.16. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. -350 с.
- 2.17. Nanevich J.E., Bly RT, Adamo R.C. Airborne Measurement of the Electromagnetic Environment Near Thunderstorm Cells// IEEE Int. Symp. EMC. 1977, P.232-236.
- 2.18. Baun R.K. Airborne Lightning Characterization // NASA Simp. Lightning Technology. 1980, P.114-117.

- 2.19. Baun S.E., Breen E.L., O'Neill J.P. Measurement of Electromagnetic Properties of Lightning with 10 nanosecond resolution// NASA Simp. Lightning Technology. 1980, P.170-174.
- 2.20. Uman M.A., Clifford D.W., Krider E.P. A Case for Submicrosecond Risetime Lightning Current Pulses for Use in Aircraft Induced-Coupling Studies//IEEE Int.Symp.EMC 1979, P.143-149.
- 2.21. Vance E.F., Uman M.A. Difference Between Lightning and Nuclear Electromagnetic Pulse Interaction // IEEE Trans. EMC.1988 N1, P.54-63.
- 2.22. Anderson R.B., Eriksen A.J. Lightning Parameters for Engineering Application// Electra. 1980 N63, P. 65-102.
- 2.23. Weidman C.D., Krider E.P. The Fire Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms // J.Geophys. Res. 1978, Vol.83 N12, P.6229-6247.
- 2.24. Fleux R.P. Research on Artificially Triggered Lightning in France// IEEE TransPAS. 1978, Vol.27 N38, P. 725-733.
- 2.25. Weidman C.D., Krider E.P. Submicrosecond Rise Times in Lightning Return Stroke Fields// Geoph. Research Letters, 1980, N7, P. 955-966.
- 2.26. Master M.J., Uman M.A., Lin Y.T., Standler R.B. Calculation of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Field Above Ground // J. Geophys. Res. - 36(1986) C12, - P 12.127-12.132.
- 2.27. Heidler F. Grundsatzlicher Vergleich Zwischen dem "Transmission Line" - Modell Und dem "Traveling Current Source" - Model// Proc. 18-Th ICPL, 1985, P. 101-110.
- 2.28. Heidler F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP - Berechnung//Proc. 18-th ICLP. - 1985. - P. 63-66.
- 2.29. Djebari B., Hamelin J., Leteinturier C., Fontaine J. Comparison Between Experimental Measurements of the Electromagnetic Field Emittedby Lightning and Different Theoretical Model - Influence of the Upward Velocity of the Return Stroke// 4th Inter. Symp. and Techn. Exhibition on EMC, -1981. P. 511-516.
- 2.30. Master M.J., Uman M.A., Krider E.P. Model Calculation of Lightning Electric Fields// Int. Aerospace Conf. Lightning Static Electricity. 1982. P.C1-0-C1-8.
- 2.31. Uman M.A., McLain D.K., Fisher R.J., Krider E.P. Currents in Florida Lightning Return Stroke// J.Geophys.Res. Vol.18 1973 P. 3530-3537.
- 2.32. Uman M.A., Braunthley R.D., Lin Y.T., Tiller J.A. Correlation Electric and Magnetic Fields from Lightning Return Strokes// J.Geoph. Res. 1975 Vol 80 N 3, P. 373-376.
- 2.33. Uman M.A., McLain D.K., Krider E.P. The Electromagnetic Radiation from a Finite Antenna // AJP 43 (1975) 5, P. 33-38.
- 2.34. Lightning Electromagnetics / Edited by Vernon Cooray // IET Power and Energy Series 62, UK, London: 2012, - 1020 p.
- 2.35. Master M.J., Uman M.A. Lightning Induced Voltages on Power Lines (Theory)// IEEE TransPAS.- 1984. - Vol.103 9. P. 2502-2515.

- 2.36. Diendorfer G., Uman M.A. An Improved Return Stroke Model with Specified Channel - Base Current // J. Geophys. Res. -1990. Vol.95 ND9. P. 13.621-13.644.
- 2.37. Lin Y.T., Uman M.A., Standler R.B. Lightning Return Stroke Models// J. Geophys. Res. -1980. Vol.85 C3. P. 1571-1583.
- 2.38. Zedden A., Leteinturier C., Dequeque P. Influence of Ground Conductivity on the Electrostatic Field Derivative Measurements// Proc. 20-Th ICLP. 1990 -P. 6.2/1-6.2/4.
- 2.39. Amoruso V., Lattarulo F. Time-Dependent Lightning - Originated Underground Electromagnetic Fields.// Proc. of the 8-th Intern. Sympos. and Techn. Exhibition on EMC, 1989 – P. 415-420.
- 2.40. Rubinstein M., Uman M.A. Methods for Calculating the Electromagnetic Fields from a Known Source Distribution: Application to Lightning // IEEE Trans. EMC-31.- vol.31. - N2, 1989.- P. 183-189.
- 2.41. Perula R.A., Rudolph T., Eriksen F. Electromagnetic Interaction of Lightning with Aircraft// IEEE Trans. on EMC.-vol.24.- N5, 1982. - P. 173-202.
- 2.42. Leteinturier C., Hamelin J., Weidman C. Correlation of Lightning Current and Electric Field Derivative// Proc.8-th Intern. Symp. and Technical Exhibition on EMC - 1989.- P.405-409.
- 2.43. Walt A.D., Maxwell E.L. Characteristics of Atmospheric Noise from 1 to 100 km // Proc.IRE 45 (1967) 6, P 45-49.
- 2.44. Uman M.A., Krider E.P. A Review of Natural Lightning: Experimental Data and Modeling // IEEE Trans. EMC. - 1982. - Vol - 24, - N 2.- P.79-111.
- 2.45. Little P.F. The Coupling of Lightning Fields into Aircraft and Cables // AGARD Lecture Series Atmospheric Electricity - Aircraft Interaction 1980- P. 8-1-8-14.
- 2.46. Trost T., Piltz F.L. Analysis of Electromagnetic Fields on an F-106B Aircraft During Lightning Strikes // Int. Aerospace Conf. Lightning Static Electricity 1982 P. B3-1-B3-11.
- 2.47. Morrison R.B. The variation with Distance in the range 0-100 km of Atmospheric Wave-Form // Philos. Mag. 1953, Vol.44 N 356, P.625-628.
- 2.48. Lutkin P.E. The Nature of Atmospheric VI // Proc. Roy. Soc. 1939 Vol.A 171 N946, P.125-129.
- 2.49. Weidman C.D., Krider E.P. The Amplitude Spectra of Lightning Radiation Fields in the Interval from 1 to 200 MHz // Radio Science.- 1986.- Vol.21, P.964-970.
- 2.50. Kravchenko V.I., Link I.Y. Investigation of Electromagnetic Environment Produced by the Lightning Discharge "Cloud-Earth"//Proc. of the 11-th Intern. Symp. on EMC, 1992 - Part 2. - P. 434 - 438.
- 2.51. Golodnyak Y.V., Kravchenko V.I., Link I.Y. Application of Antennal theory for Definition of Electromagnetic Fields Radiated by the Lightning "Cloud - Earth"//Proc. of the 5-th Intern. Symp. on Anten. and Prop. 1992.- P.452-455.
- 2.52. Krider E.P., Weidman C.D., Noggle H.C. The Electric Fields Produced by Lightning Stepped Leaders // J. Geophys. Res. 1977 Vol.82 N5, P. 929-933.

2.53. McCormick W.S. The Estimation of Induced Voltages Peak Magnitude and Energy Level under LTA / EMP Excitation of Low-loss Aircraft Cabling // IEEE Trans. EMC 1979 Vol.21 N2, P.136-146.

2.54. Beasley W.H., Master M.J. Merits of Supplemental Ground Based Measurements of Lightning Electric Fields in the Interpretation of Airborne Measurements // Int. Aerospace. Conf. Lightning Static Electricity. 1982, Vol. 1 P.A1-0-A1-7.

2.55. Rustan J.P.L. The Lightning Threat to Aerospace Vehicles // J. Aircraft. 1986, Vol.23 N1, P.17-21.

2.56. Hubert P. Lightning Subsequent Strokes. Theoretical Model Prediction Compared with Observation on Triggered Lightning Event // Proc. 18-th ICLP 1985 – P. 19-22.

2.57. Исследование параметров импульсов напряженности электрического поля ближних и дальних разрядов молнии / А.А. Ализаде, Ф.Л. Хыдыров, А.Х. Аджиев, Е.М. Богаченко // Изв. АН Аз. ССР Серия физико-технических и математических наук 1987, N6, С. 113-118.

2.58. Serhan G.I., Uman M.A., Childers D.G., Lin Y.I. The Spectra of First and Subsequent Lightning Return Strokes in the 1 to 200 km Range // Radio Science Vol 15, N6, 1980.- P.1089-1094.

2.59. Uman M.A., Swanderg C.E., Tiller J.A., Lin Y.T., Krider E.P. Effects of 200km Propagation of Florida Lightning Return Electric Fields // Radio Science, 1976, Vol 11 N12 p.985-990.

2.60. Leal A.F.R., Rakov V.A. Characterization of Lightning Electric Field Waveforms Using a Large Database: 1. Methodology / IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.- XX.2021. (This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal). Цифровой код: 0.1109/ТЕМС.2021.3059266..

2.61. Leal A.F.R., Rakov V.A. Characterization of Lightning Electric Field Waveforms Using a Large Database: 2. Analysis and Results / IEEE IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.- XX.2021. (This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal). Цифровой код: 10.1109/ТЕМС.2021.3062172.

2.62. Вычислительные методы в электродинамике: Пер. с англ. / Под ред. Р. Митры. - М.: Мир, 1977. - 485 с.

2.63. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. -М.: Сов. Радио, 1974. – 536 с.

2.64. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели: Пер. с англ./ Под. ред. Л.Д. Разумова.-М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.

2.65. Тимофеев Б.Б. Специальные задачи теории поверхностного эффекта. - Киев: Наукова думка, 1966. – 189 с.

2.66. Amitabh Nag. Lightning Locating Systems: Characteristics and Validation Techniques / Amitabh Nag, Martin J. Murphy, Wolfgang Schulz, Kenneth L. Cummins // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.- p.824-836.

- 2.67. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Наука, 1978. - 544 с.
- 2.68. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. - М.: Л.: ОГИЗ, 1943. – 627 с.
- 2.69. Pearlman R.A. Lightning near Fields Generated by Return Stroke Current // IEEE Intern. Symp. on EMC, 1979, P.68-71.
- 2.70. Horvath T, Lendvei G., Schwarcz P. Mathematical Modeling of the Propagation of Lightning Channel and the Striking Process // Proc. 18-th ICLP 1985 P.89-94.
- 2.71. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И.Кравченко -М.: Радио и связь, 1987. -256 с.
- 2.72. Kravchenko V.I., Golodnyak Y.V. Research of the Lightning Electromagnetic Fields Structure for Testing Radioelectronic Equipment on Conformity to Requirement of Electromagnetic Compatibility // Proc. 12-th Intern. Symp. on EMC, 1994. - P. 335-339.
- 2.73. Cooray, V., Propagation effects due to finitely conducting ground on lightning generated magnetic fields evaluated using Sommerfeld's equations, IEEE Trans. EMC, vol. 51, 526–531, 2009.
- 2.74. Cooray, V., On the accuracy of several approximate theories used in quantifying the propagation effects on lightning generated electromagnetic fields, Trans. IEEE: Ante. Prop., vol. 56, no. 7, 1960–1967, 2008.
- 2.75. Baba, Y. and V. A. Rakov, Evaluation of lightning return stroke electromagnetic models, 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 2008, pp. 1a11–1a18.
- 2.76. Cooray V. Horizontal electric field above and underground produced by lightning flashes, IEEE Trans. EMC, vol. 52, 936–943, 2010.
- 2.77. MIL-STD-464C:2010 Department of defense. Interface standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. DoD.-2010. - 165 p.

Глава 3. МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗАВАРИЙНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ГРОЗОВЫХ УСЛОВИЯХ

3.1 Научно-технические основы системы раннего предупреждения грозовой опасности

Необходимость создания комплексной системы раннего предупреждения о грозовой опасности так обоснована в Международном стандарте IEC 62793:2016 [3.1]: естественная электрическая активность в атмосфере и, в частности, молнии представляют серьезную угрозу для окружающего пространства. Ежегодно разряды молнии наносят большой материальный ущерб производственной деятельности человека, создают угрозу нормальной эксплуатации транспортных средств, прежде всего летательных аппаратов и нередко приводят к гибели людей.

В связи с этим большое значение для своевременного нахождения и идентификации таких опасных природных явлений как грозы, а также принятия мер защиты от них (в том числе и методами активного воздействия) имеют системы раннего предупреждения и средства дистанционного зондирования атмосферы.

Так, например, в авиации для обеспечения безопасности воздушного движения и своевременного изменения маршрута необходимо иметь достоверные данные о метеообстановке как перед полетом, так и во время его прохождения. По данным международной организации гражданской авиации (ИКАО) за последние 25 лет неблагоприятные метеорологические условия были официально признаны причиной от до 20% авиационных происшествий. Из-за грозowych явлений особенно часто наблюдаются выходы из строя аэронавигационного оборудования и приборов связи.

Грозовые атмосферные явления напрямую связаны с кучевыми облаками, формирующимися на высотах от 2 до 12 км. Скорость

перемещения грозового облака над поверхностью земли зависит от многих факторов. В среднем она составляет около 40 км/ч, но в экстремальных ситуациях некоторые грозы движутся гораздо быстрее – со скоростями 65-80 км/ч. Поэтому во избежание негативных последствий, вызываемых грозой, необходимо обладать данными о метеорологической обстановке в режиме реального времени в конкретных областях.

Степень грозовых воздействий на окружающее пространство определяется интенсивностью грозовой деятельности. Интенсивность грозовой деятельности для различных климатических районов достаточно сильно отличается друг от друга и напрямую зависит от влажности воздуха и среднегодовой температуры данной местности. Высокая температура способствует интенсивному образованию грозовых облаков.

Грозовую интенсивность принято характеризовать числом грозовых дней в году или общей продолжительностью гроз в часах, приходящихся на один год. Последняя характеристика более правильная, так как число ударов молнии в землю зависит не от числа гроз, а от их общей продолжительности [3.2].

Средняя за год продолжительность гроз сильно зависит от района и изменяется в широких пределах [3.3]: от 5 часов в северных районах до 80 часов в южных. По данным многочисленных наблюдений в районах с числом грозовых часов в году $n = 30$ поверхность земли площадью 1 км² в среднем поражается молнией 2 раза в год. Эти данные позволяют оценивать частоту поражения молнией различных объектов.

В табл. 3.1 приведено соотношение между интенсивностью грозовой деятельности и средним числом поражений молнией земной поверхности [3.4].

Научно-техническую основу системы раннего предупреждения грозовой опасности составляет анализ грозовой электромагнитной обстановки на всех стадиях ее формирования и развития.

Для этих целей в [3.1] предложена классификация очередности регистрируемых фаз развития жизненного цикла грозы. В этом аспекте выделены четыре различные фазы: начальная фаза (фаза 1), фаза роста (фаза 2), зрелая фаза (фаза 3) и фаза диссипации (фаза 4).

Таблица 3.1 - Соотношение между интенсивностью грозовой деятельности и средним числом поражений молнией земной поверхности [3.4]

Среднегодовая продолжительность гроз, ч	Удельная плотность ударов молнии в землю n , 1/(км ² ·год)
10 — 20	1
20 — 40	2
40 — 60	4
60 — 80	5,5
80 — 100	7
100 и более	8,5

Начальная фаза представляет собой фазу электризации облака посредством разделения электрического заряда внутри облака. Заряды распределяются в областях внутри облака и создают электростатическое поле на уровне земли. Это считается первым обнаруживаемым явлением перед грозой. Электростатические поля могут создавать потенциальную опасность, такую как электростатические разряды, даже в случае отсутствия молнии.

Фаза роста характеризуется появлением первых грозовых разрядов: внутриоблачного (IC) или облако-земля (CG). Первые вспышки типа IC появляются после определенного развития областей заряда в облаке. Однако в некоторых ситуациях нет четкой временной задержки между первой вспышкой типа IC и первой вспышкой типа CG. Вспышки типа IC, как правило, представляют большую часть (до 80%) общей молниевой активности, генерируемой грозой. Для отдельных гроз характерны значительные различия в скорости развития IC / CG шторма.

Зрелая фаза характеризуется наличием большого числа вспышек типа CG и IC.

Фаза рассеяния характеризуется отсутствием вспышек типа CG, уменьшением числа вспышек типа IC и уменьшением электростатического поля над поверхностью земли до хорошей погоды.

Типичные грозовые ячейки характеризуются диаметром 10 км, высотой облаков 12 км и жизненным циклом около 30 мин [3.1].

Модель распределения разно полярных объемных зарядов типичного грозового облака содержит три области. Сосредоточенный отрицательный объемный заряд находится в

середине облака, более рассеянный положительный заряд в виде слоя расположен выше него и небольшой «карман» положительных зарядов ниже отрицательной области.

Молния имеет тенденцию начинаться на краю или вблизи края отрицательно заряженной области, и, если она начинается вблизи верхней части слоя, она обычно развивается в облачный тип IC-разряд. Электрический заряд в грозовом облаке создает на поверхности земли электростатическое поле, напряженность которого существенно больше (≥ 1000 В/м), чем напряженность электрического поля в хорошую погоду (<150 В/м). Таким образом, измерение электрического поля атмосферы может обеспечить элемент предупреждения, однако с некоторыми ограничениями. Одно из этих ограничений заключается в том, что электрическое поле на уровне земли не является истинным полем, создаваемым зарядом облака, поскольку между облаком и землей существуют значительные слои пространственного заряда. Поэтому невозможно определить точный порог поля, который соответствует неизбежному удару молнии. Второе ограничение заключается в том, что электрическое поле может быть измерено только в непосредственной близости (на расстоянии нескольких километров) от грозы. Тем не менее, мониторинг напряженности электрического поля в атмосфере, является обязательным элементом системы предупреждения на космодромах и непосредственно на летательных аппаратах. Важная особенность этого мониторинга состоит в том, что он позволяет фиксировать процесс зарождения грозового облака - начальную фазу (фаза 1), который не регистрируется другими методами. Наличие достаточно высокой напряженности электрического поля (≥ 7000 В/м) является необходимым, хотя и не достаточным, условием появления молнии в данном месте. Молнии, как и многие другие природные явления, имеют статистический характер. Поэтому, затруднительно получить точную информацию о том, когда и где ударит молния. Безусловно, что достоверность такого прогноза зависит от комплексного обеспечения мониторинга окружающей среды. Наиболее развитая система реализована в США, за счет объединения информации с разнообразных источников, включая радиолокационные станции слежения, спутниковые данные, данные с метеозондов, системы разнообразных датчиков, расположенных в особо контролируемых зонах, например, космодроме на мысе Канаверал (Флорида, США).

На космодроме (мыс Канаверал) система обнаружения и определения места расположения молнии (LDAR) состоит из 7 антенн УКВ диапазона (рис. 3.1), обеспечивающая регистрацию электрических разрядов, в том числе разрядов внутри облака, облако-облако, облако-воздух и облако-земля [3.5].

Система предупреждения о молниевой опасности на пусковой площадке (LPLWS) на мысе Канаверал (рис. 3.2) представляет собой дополнительную сеть из 31 сенсора электрического поля [3.5, 3.6]. В качестве сенсора электрического поля используется сенсор, построенный на принципе переменного конденсатора, который формируется системой не менее двух секторальных обкладок, одна из которых вращается с заданной скоростью. Поэтому, такие сенсоры называют полевой «мельницей» (field mill). В русскоязычной литературе такие сенсоры называются «роторный». Внешний вид роторного сенсора представлен на рис. 3.3 [3.7].

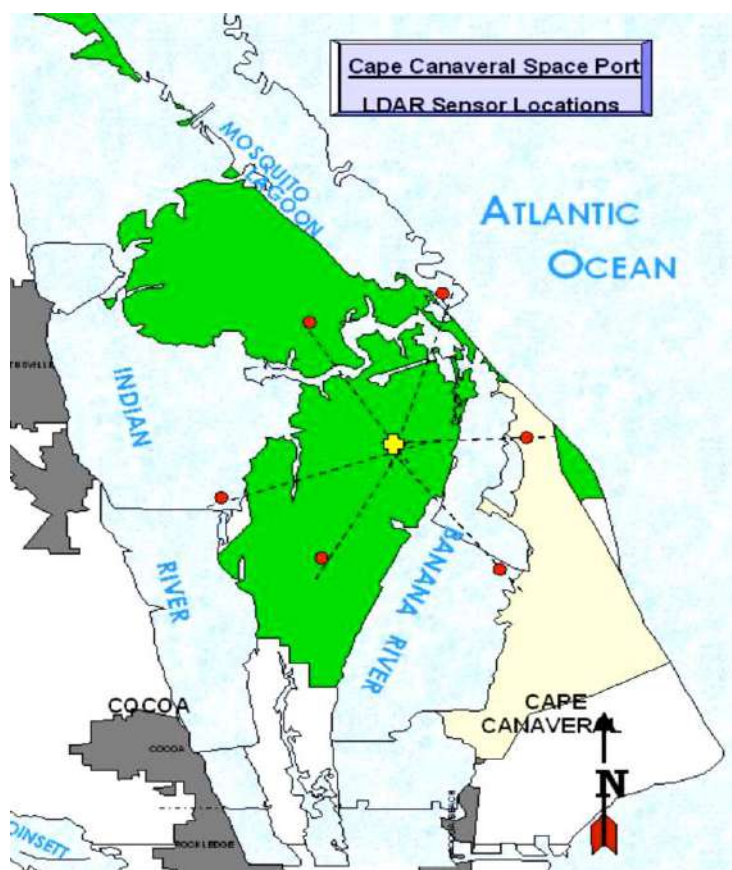


Рис. 3.1 – Расположение сенсоров детектирования молний [3.6]
(Location of the Lightning Detection and Ranging (LDAR) sensors)

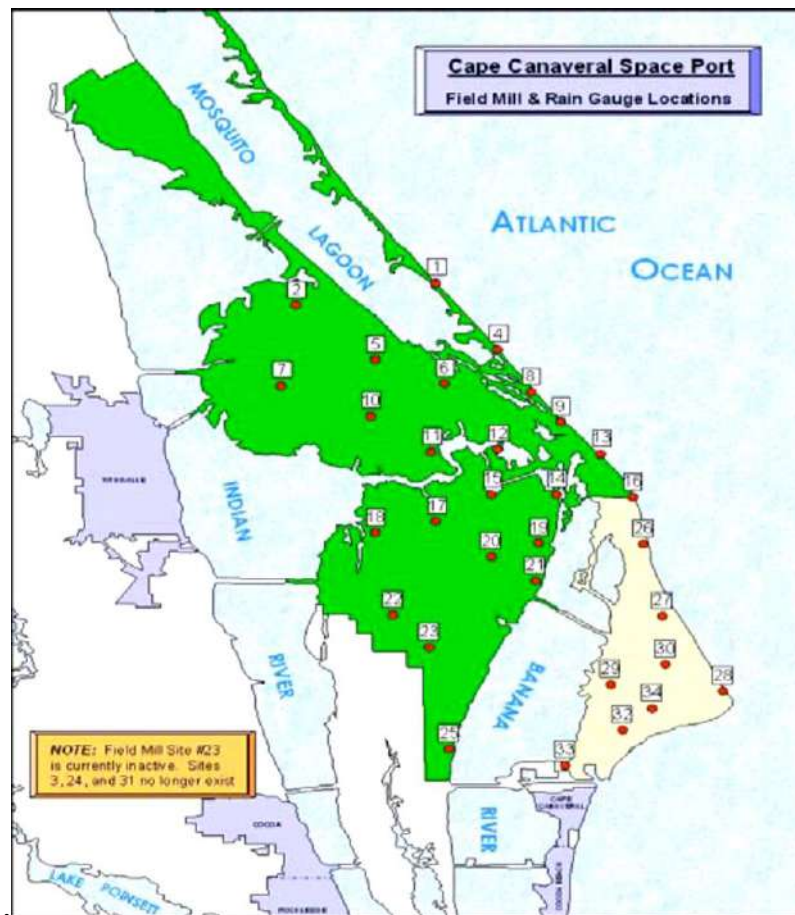


Рис. 3.2 – Расположение сенсоров системы предупреждения о молниевой опасности на стартовой площадке [3.6]
(Location of the Launch Pad Lightning Warning System (LPLWS) sensors)



Рис. 3.3 – Внешний вид сенсора электрического поля типа «мельница» (An electric field mill) [3.7]

Основные технические характеристики системы предупреждения основанной на использовании полевой «мельницы» представлены в таблице 3.2 [3.5].

Таблица 3.2 – Технические характеристики системы предупреждения о молниевой опасности, расположенной на космодроме Канаверал [3.5]

Число сенсоров	31
Расстояние между сенсорами	2 – 5 км
Эффективный диапазон расстояний	до 20 км
Тип детектируемых молний	все
Вероятность определения молнии	более 90%
Расположение молниевоего процесса	центр заряда
Точность определения местоположения	2 – 20 км
Число локаций на разряд молнии	1
Предельная частота локации	85 в минуту
Изготовитель	Разработано AF/NASA

Основные требования к системам мониторинга грозовой электромагнитной обстановки представлены в стандарте [3.1]. В течение последних десятилетий технические системы, включая системы, предназначенные для мониторинга естественной электрической активности атмосферы и молнии, получили широкое развитие. Эти системы могут предоставлять высококачественную и ценную информацию в режиме реального времени о возникновении грозы, что обеспечивает практический результат, если она согласована с подробным планом действий. Хотя эта информация позволяет пользователю принять ожидаемые временные превентивные меры, следует отметить, что все меры, которые должны быть приняты на основе информации мониторинга, являются ответственностью пользователя системы согласно соответствующим правилам. Эффективность будет во многом зависеть от степени риска и стоимости планируемых действий.

Успешное решение проблемы, связанной с безопасностью жизнедеятельности человека и защитой различных объектов от воздействия стихийных явлений, во многом определяется техническим уровнем своевременного обнаружения

местоположения этих явлений и достоверным контролем их состояния. Несомненно, важнейшим параметром мониторинга грозовой активности является определение места разряда молнии.

Мониторинг грозовых явлений обеспечивается посредством измерений с использованием различных методов и датчиков определения местоположения. К ним относятся: магнитные дальнометры, измерители напряженности электрического поля, измерители силы и направления радиочастотного сигнала.

Частотные диапазоны, которые используются при обнаружении молнии следующие:

- DC: статические и квазистатические электрические поля;
- VLF: очень низкие частоты (3 кГц - 30 кГц);
- LF: низкие частоты (30 кГц - 300 кГц);
- VHF: очень высокие частоты (30 МГц - 300 МГц).

На рис. 3.4 представлено обобщенное распределение технологий реализации вышеупомянутых принципов по частотному диапазону [3.8].

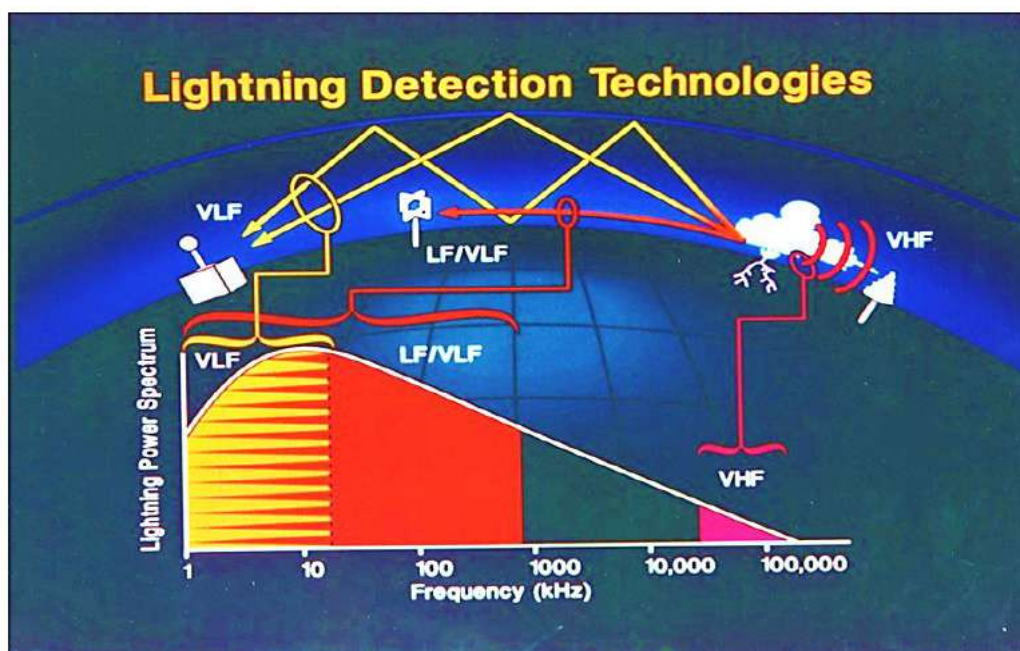


Рис. 3.4 - Технологии обнаружения молний [3.8]

Есть несколько способов классифицировать средства обнаружения гроз в целом и мест ударов молнии в частности. Первый способ - регистраторы фазы грозы, для которого, в частности, предназначены детекторы грозовых явлений. Второй способ базируется на сравнении среднестатистического диапазона

частот электромагнитного излучения молнии с диапазоном частот регистрируемым датчиком в процессе измерений. Третий способ - использование датчиков для обнаружения разряда молнии как явления с последующим определением расчетным методом места его расположения.

В соответствии с [3.1] детекторы грозовых явлений классифицируются по следующему принципу:

- *класс А*: обнаруживают грозу в течение всего ее жизненного цикла (фазы 1–4);
- *класс В*: обнаруживают вспышки типа IC и CG (фазы 2–4);
- *класс С*: обнаруживают только вспышки типа CG (фазы 3 и 4);
- *класс D*: обнаруживают вспышки типа CG (фаза 3) и другие электромагнитные источники с очень ограниченной интенсивностью.

Как следует из приведенной классификации детекторы грозы подразделяются в зависимости от регистрации фаз грозы и от обнаруживаемых явлений. При этом, детектор гроз может обнаружить одно или несколько явлений, а их классификация ни как не определяет общую эффективность системы мониторинга грозовой активности и не дает приоритет одному из этих классов.

Назначение детекторов *класса А* состоит в том, чтобы обнаружить первые признаки грозы (фаза 1), что обеспечит раннее предупреждение и принятие предупредительных мер, до возникновения молнии внутри облака или от облака к земле. Мониторинг осуществляется в течение всего времени, когда существует риск формирования и разряда молнии. Обнаружение проводится путем измерения электростатического поля, создаваемого грозовой тучей. Грозовые электрические процессы сами по себе приводят к изменению электростатического поля.

Датчик электрического поля для предгрозового мониторинга с учетом вышесказанного, в соответствии с требованиями стандарта [1], должен иметь начальную чувствительность 200 В/м и возможность измерять напряженности электрических полей в диапазоне не менее ± 20 кВ/м.

Изменения электростатического поля во время начальной фазы относительно медленные, и выборки поля каждые несколько секунд достаточно. Если для применения датчика требуется информация об изменениях поля, рекомендуется минимальная частота дискретизации, равная одной выборке в секунду. Достаточно чтобы

детекторное устройство предоставляло информацию об уровне электрического поля не чаще чем раз в секунду.

Таким образом детекторы класса А могут обнаруживать присутствие или отсутствие электризованного облака. Однако нет четкого порога электростатического поля, который бы определял тот его уровень, при котором инициируются первые разряды молнии. Область мониторинга сильно ограничена быстрым уменьшением электростатического поля с расстоянием. В связи с этим, измерение электростатического поля грозового облака может производиться на расстояниях, как правило, не более 20 км от границы области заряда. Поскольку этот вид детектора зависит от топологической среды, он используется в качестве локального детектора.

Для нужд авиации, при использовании детекторов *класса А*, построение системы ближнего оповещения для конкретной локальной области следует учесть схему организации по принципу «штормового кольца». При этом, для получения сведений об опасных явлениях погоды привлекаются метеостанции различного назначения (авиационные метеостанции, метеостанции общего назначения, метеорологические посты и т.п.). Обычно для создания «штормового кольца» привлекаются метеостанции, расположенные не ближе, чем 20 км и не дальше чем 200 км от аэродрома. Эти расстояния обусловлены тем, что при средней скорости смещения барических образований и атмосферных фронтов в 40 км/ч опасное явление погоды «пройдет» 20 км быстрее, чем службы эропорта успеют отреагировать, а пока явление смещается на 200 км, то за счет даже только суточного хода, погода может настолько измениться, что информация 5 - 7 часовой давности окажется нерепрезентативной.

В настоящее время наиболее широко используются системы определения местоположения молний на основе детекторов *классов В и С*. Такие системы предназначены для набора статистических данных, на основе которых можно определить пространственное распределение плотности поверхностных отрицательных разрядов кучевой облачности, являющееся основным фактором зарождения молний, и которые необходимы практически во всех исследованиях по обеспечению молниезащиты объектов. Многопозиционные системы определения местоположения молний (LLS) или системы обнаружения молний (LDS) являются безусловно наилучшим доступным инструментом для составления картины распределения

плотности пространственных зарядов кучевой облачности для достаточно больших регионов. Эти системы, помимо местоположений разрядов молний, также позволяют получить информацию о пиковых значениях силы тока, полученных посредством измерений формируемых ими электрических или магнитных полей [3.8, 3.9].

Детекторы *класса D* в практике мониторинга грозовых явлений используются исключительно в качестве грозоотметчиков, фиксирующих факт наличия фазы З дальних гроз.

3.2 Средства измерения электростатического поля предгрозовой обстановки в атмосфере Земли

В настоящее время для оперативного предупреждения о грозовой опасности некоторыми фирмами предлагается использовать сенсоры электростатического поля, реагирующие на достижение определенного уровня напряженности поля. Так, известен сенсор роторного типа EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor (рис. 3.3) компании BOLTEK CORPORATION. Сенсоры такого типа имеют быстро вращающиеся пластины (частота вращения достигает тысяч оборотов в минуту), что требует значительной мощности электрического питания и создает значительные проблемы в обслуживании. Испанская компания Aplicaciones Technologicas рекламирует локальную систему, в которой используется сенсор, изготовленный по технологии SECC Technology (controlled field electrometric sensor) без использования механических элементов (рис. 3.5). Очевидным недостатком этих систем является наличие гальванической связи с устройством обработки информации, что несомненно может приводить к сбоям в работе всей системы в условиях грозы.



Рис. 3.5 – Элементы локальной TWS ATSTORM

Кроме отмеченных выше очевидных недостатков предлагаемых локальных систем, следует отметить что степень достоверности грозовой опасности, как показано в [3.10] определяется корреляцией уровня напряженности электрического поля и скоростью его нарастания. Следовательно, можно предположить, что предлагаемые на рынке локальные системы не обеспечивают максимально возможной степени достоверности предупреждения о грозовой опасности из-за значительного числа ложных срабатываний. Кроме того, при определении тревожного уровня напряженности предгрозового электрического поля наблюдаются существенные расхождения. Однако, измерение электрического поля атмосферы Земли позволяет производить локальный мониторинг предгрозовой обстановки определяя вероятность возникновения молниевых разрядов.

Вибрационный вольтметр. В системе металлических электродов с электрическим полем между ними можно изменять емкость за счет периодического изменения пути интегрирования. На этом и основан принцип работы вибрационных вольтметров. Электрод совершает синусоидальные колебания, при этом меняется емкость. При каждом изменении емкости через сопротивление R протекает заряд ΔCU , что дает на частоте колебаний f_c среднее значение тока:

$$i = \frac{dq}{dt} = f_c \Delta CU .$$

Следующим этапом развития роторного и вибрационного вольтметра является реализация подобных конструкций в микромасштабе. Технология микро электромеханических сенсоров (МЭМС) [3.11-3.14] позволяет разработать вибрационный вольтметр в виде кристалла микросхемы размером 5 x 5 мм. Функциональная схема и внутренняя структура микромеханического электростатического МЭМС вольтметра изображена на рис. 3.6 и рис. 3.7 [3.11].

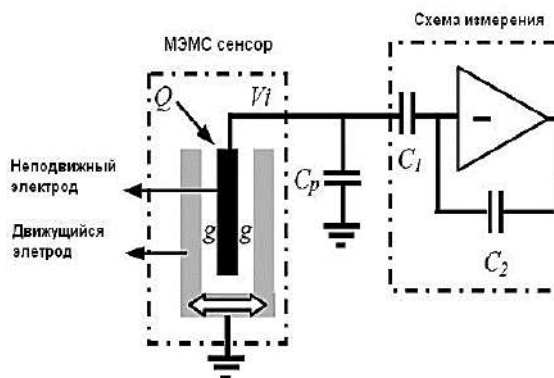


Рис. 3.6 – Функциональная схема микромеханического вольтметра [3.11]

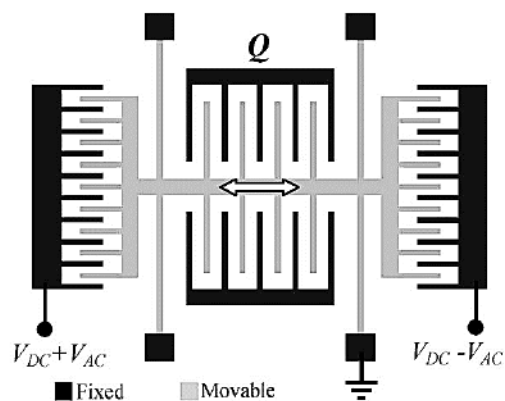


Рис. 3.7 – Внутренняя структура микромеханического вольтметра [3.11]

Эта система использует тот же принцип измерения электростатического поля что и роторный вольтметр – закон электрической индукции. При вибрационном движении подвижной части микромеханической структуры, при воздействии электростатического поля происходит индукция зарядов на поверхность пластины переменного конденсатора, который соединен через интерфейсную часть микросхемы со схемой усиления. Емкостная МЭМС структура продуцирует ток, который пропорциональный амплитуде и полярности приложенного внешнего электрического поля. Ток усиливается и преобразовывается в напряжение схемой усиления для дальнейшей оцифровки и обработки полученных данных. На рис. 3.8 представлено изображение реального микро механического вольтметра электростатического поля [3.14].

Данная МЭМС конструкция преобладает рядом преимуществ в отношении к роторным и вибрационным вольтметрам. Основное достоинство МЭМС вибрационных вольтметров заключается в микронных размерах их конструкции. Это повышает уровень износостойкости микромеханических движущихся частей; снижает энергопотребление, что дает возможность использовать аккумуляторное питание без частой подзарядки, а измерительная часть устройства имеет гораздо меньшие габариты, и представляет собой микросхему в малогабаритном корпусе, а, следовательно, обладает высокой пространственной разрешающей способностью [3.12]. Подробно, с математическими моделями МЭМС устройств и

описанием реальных конструкций можно ознакомиться в работах [3.13-3.14].

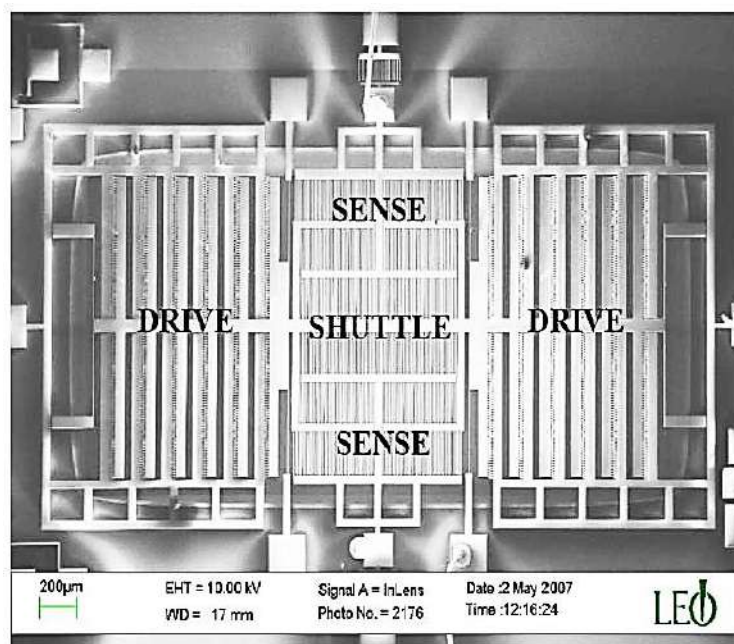


Рис. 3.8 – Фото микроскопической структуры микромеханического вольтметра [3.14]

3.3 Системы мониторинга грозовой активности

В ряде экономически развитых странах существуют национальные сети регистрации молний, обеспечивающие грозовой прогноз. К наиболее известным современным многостанционным региональным и глобальным системам обнаружения (локализации) молнии относятся [3.8]:

- *Национальная сеть США по обнаружению молний (NLDN, https://ghrc.nsstc.nasa.gov/home/lightning/index/data_nldn; <https://www.vaisala.com/en/products/national-lightning-detection-network-nldn>)*, работающая в диапазоне 400 Гц - 400 кГц, основанная на использовании комбинации методов измерения времени прихода (TOA) и магнитной пеленгации (MDF). Мониторинг осуществляется только на территории США, информация предоставляется на коммерческой основе.

- *Общая грозовая сеть (WeatherBug, <https://www.weatherbug.com/>)*, предоставляющая информацию в реальном времени по всем регионам Земли о метеорологических условиях, включая грозы.

- *Total Lightning Network* (<https://www.earthnetworks.com/why-us/networks/lightning>) сеть насчитывает более 1800 датчиков, охватывающих более 100 стран по всему миру, и является самой обширной и технологически продвинутой глобальной сетью мониторинга. Сеть способна контролировать и отличать внутриоблачные молнии, обеспечивая наиболее полную систему оповещения о молнии. Обнаружение молний в облаках позволяет быстрее генерировать предупреждения о грозах и предупреждать о других формах погоды, таких как торнадо, нисходящие потоки и град. На рис. 3.9 представлен скриншот с этого сайта с итогами регистрации молний на территории США в 2020 году. Видно, что доля молний CG составила 7% от общего числа.



Рисунок 3.9 – Результаты мониторинга молниевой активности в 2020 г.

- *Всемирная сеть определения местоположения молний (World Wide Lightning Location Network - WWLLN, <http://wwlln.net>)*, работает в частотном диапазоне 6 - 18 кГц, используя метод измерения времени прихода сигналов от группы датчиков, зарегистрировавших излучение от молний (TOGA). Недавние исследования показывают, что эффективность обнаружения ударов с силой тока около 30 кА составляет примерно 30% во всем мире.

- Новая активно развивающаяся сеть пеленгации молний (https://www.blitzortung.org/en/live_lightning_maps.php) основана на использовании простых индукционных датчиков магнитного поля, которые компания из ФРГ продает всем желающим, с последующим подключением в общую интернет сеть. Результат работы этой сети в реальном времени отражает молниевую активность в любой точке мира. Точность определения координат молнии зависит от числа

датчиков, которые зафиксировали сигнал. В качестве примера, на рисунке 3.10 представлен скриншот с этого сайта. Недостатком этой системы является отсутствие архива событий и скоротечность смены информация, что не позволяет использовать данные для анализа и установления направления движения грозового фронта.

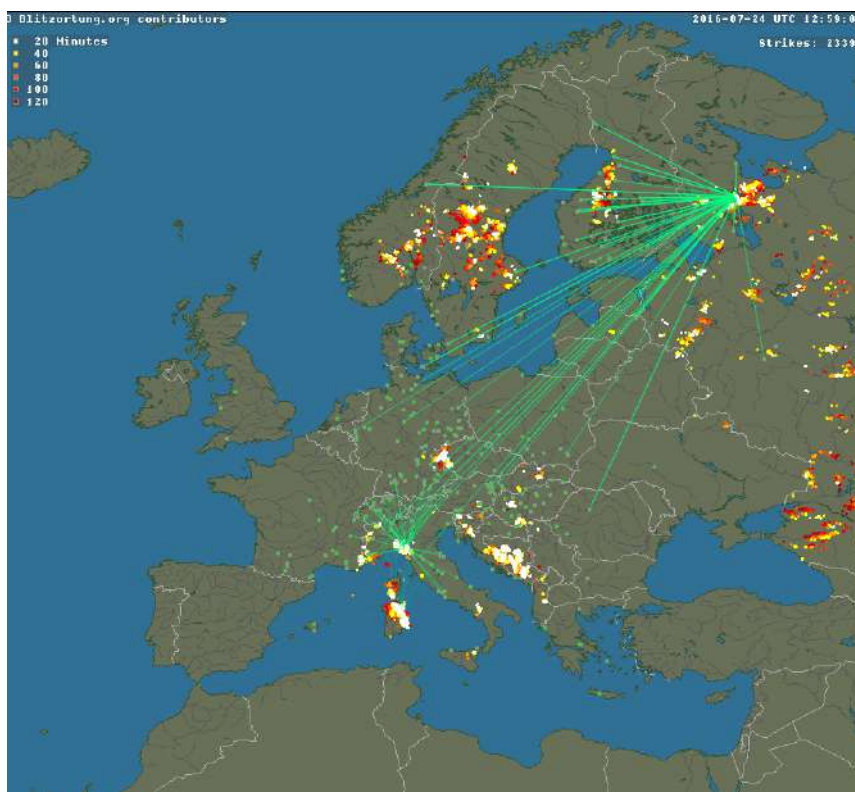


Рис. 3.10 – Место удара молнии определяется точкой пересечения линий (изменяется в реальном времени)

Наиболее развитая инфраструктура создана в США, где функционирует несколько независимых сетей. Основной сетью является Национальная сеть обнаружения молний (NLDN), которая насчитывает более 100 стационарных станций, расположенных по всей территории Соединенных Штатов, и несколько спутников на геостационарной орбите, обеспечивающих визуальное наблюдение гроз. Каждая из этих станций оснащена различными средствами для измерения электромагнитных эффектов, которые сопровождают разряды молний. Разработчики NLDN утверждают, что обеспечивают фиксацию индикаций, по крайней мере, 95% всех разрядов молний «облако-земля», токи которых превышают 5 кА. Точность локаций разрядов по площади в пределах 500 м. Данные LLS / LDS могут также использоваться для классификации

неисправностей в энергосистемах и во многих других приложениях, включая мониторинг грозовой активности в режиме реального времени.

Однако, необходимо отметить, что создание и эксплуатация таких систем требуют значительных финансовых вложений и постоянного обслуживающего персонала, чего большинство стран в мире не могут себе позволить.

Повышение эффективности обнаружения и распознавания гроз возможно также с помощью пассивных средств регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) грозовых разрядов. К таким средствам относятся однопунктовые и многопунктовые системы определения местоположения грозовых очагов и разрядов. В большинстве из них (исключение составляют многопунктовые разностнодальномерные системы) используются радиопеленгаторы и дальномеры, технические основы которых были заложены еще в 20-е годы прошлого века. Во второй половине 20-го века использовались преимущественно узкополосные гронопеленгаторы с амплитудным и амплитудно-фазовым преобразованием сигналов. В начале 90-х годов появились проекты по разработке широкополосных модификаций приемников для гронопеленгаторов. Из наиболее известных в Российской Федерации решений можно отметить гронопеленгаторы-дальномеры “ШТОРМ”, “ОЧАГ-2П”, “Пеленг”, “ПАГ-1”, “Верёя” и “Алвес”. Современные системы мониторинга грозовой активности позволяют получать возможность раннего предупреждения о грозовой опасности в интересующем районе. Хорошо зарекомендовали себя в этой области компании Vaisala и Voltek, выпускающие надёжное и высокоточное оборудование, прошедшее многолетнюю проверку в сетях наблюдений NLDN, NASA, ALDIS и EUCLID.

Заслуживают также внимания методы, основанные на использовании комплекса регистрации электрических параметров как предвестников микроструктурных изменений в облаках. Такие системы эксплуатируются в Северо-Кавказском федеральном округе Российской Федерации [3.15]. Станция гронопеленгации «Армавир» (<http://www.wxinfo.ru/index.php?Index=3&active=0>), установленная на Северном Кавказе, состоит из четырех гронопеленгаторов LS 8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от гронопеленгаторов.

В процессе работы комплекс позволяет решать следующие задачи:

- обнаружение молниевых разрядов;
- измерение пеленга, дальности, времени приёма и оценка электромагнитных параметров разрядов;
- отображение грозовой обстановки в зоне ответственности на экране монитора с привязкой к карте местности;
- автоматическая выдача информации о координатах и параметрах грозовых очагов потребителям в сеть;
- документирование, архивирование, статистическая обработка полученной информации.

Радиус зоны ответственности комплекса – более 1000 км. Относительная погрешность определения дальности для равнинной местности не более – 10 %, пеленга – не более 30 с при ежеминутной выдаче информации.

Грозопеленгационная сеть обнаружения молний комплекса LS 8000 определяет с высокой точностью и передает в центр приема данные о внутри- и межоблачных разрядах, а также разрядах облако – земля. Кроме того, она позволяет определять местоположение гроз, знак заряда и интенсивность, с какой скоростью и в каком направлении движутся грозовые очаги и характер их развития.

Эта система обеспечивает сбор, архивирование и передачу потребителям следующей грозоразрядной информации:

- координат молниевых разрядов облако – земля отрицательной полярности (разряды LF–);
- координат молниевых разрядов облако – земля положительной полярности (разряды LF+);
- координат молниевых разрядов облако – облако и внутриоблачных (разряды VHF);
- параметры этих молниевых разрядов.

Непосредственно грозовое излучение регистрируется даже радиоприемником, так как грозы сопровождаются мощными электрическими разрядами и излучают в широком диапазоне длин волн. Современные автоматизированные системы грозопеленгации, в отличие от грозоотметчиков и грозорегистраторов, подсчитывают количество разрядов, определяют направление и устанавливают их местоположение. Пеленгация молниевых разрядов представляет собой источник метеорологической информации, которая имеется во многих странах, но не эксплуатируется в оптимальном режиме.

Несмотря на то, что многие метеослужбы имеют доступ к данным о разрядах молний, их использование остается ограниченным, хотя, например, они позволяют достаточно легко определить заранее, имеет ли конвективная ячейка, наблюдаемая радиолокатором, тенденцию к мощным ливневым осадкам или даже её градоопасность.

3.4. Индикатор уровня напряженности электрического поля в атмосфере Земли

В процессе исследований реальных защитных свойств молниеприемников с ранней стримерной эмиссией (ESE), которые проведены в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», установлено, что процесс формирования коронного разряда с металлических стержней в больших воздушных промежутках (более 1 м) носит импульсный характер, что дополняет результаты, полученные Тричелом и Кипом (1938 г.) для коротких промежутков (не более 10 см). Кроме того, установлено, что частота появления импульсов (стримеров) зависит от уровня напряженности электрического поля. На основании этого факта предложено в качестве индикатора напряженности электрического поля использовать устройство, в котором чувствительным элементом является металлический стержень. Основные результаты исследований изложены в работах [3.16-3.24]. Далее кратко представлено основные положения указанных работ.

Теоретическое обоснование гипотезы о преимуществах стержня с плоской вершиной проведено путем исследования влияния на предразрядные условия параметров системы молниеприемник – проводящая плоскость, имитирующая облако. Математическая модель начальной фазы процесса образования стационарной короны вокруг вершины стержневого молниеприемника выбрана максимально приближенной к параметрам физической модели, которая регламентирована при проведении испытаний ESE-терминалов по стандарту Франции NF C 102-17:2011. Геометрические параметры модели таковы: электростатическое поле образуется двумя круглыми пластинами диаметром $2R = 10$ м каждая. Одна из пластин находится под потенциалом U , другая заземлена ($U = 0$). Расстояние (H) между пластинами варьируется в диапазоне от 3 м до 10 м. Длина

стержневого молниеприемника (h) выбрана равной 2 м, в тех случаях, когда не указано иное.

Рассмотрена математическая модель электростатической задачи расчета распределения напряженности электрического поля по поверхности металлического стержня, который находится в электрическом поле заданной напряженности, и в воздушном пространстве вокруг стержня. Путем введения скалярного потенциала уравнением $E = -grad \varphi$, получено классическую постановку внутренней задачи Дирихле для потенциала φ , с соответствующими граничными условиями:

$$\Delta \varphi = 0, \quad (3.1)$$

$\varphi /_{s_1} = U$, где s_1 - поверхность потенциального электрода;
 $\varphi /_{s_2} = 0$, где s_2 - поверхность заземленного электрода;
 $\varphi /_{s_3} = 0$, где s_3 - поверхность стержня;
 $\varphi(r) \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$, где r - расстояние от центра декартовых координат, расположенный в геометрическом центре поверхности нижнего электрода.

При этом были приняты основные предположения:

- относительная диэлектрическая проницаемость воздушной среды равна 1;

- выбранные размеры пластин позволяют не учитывать влияние краевого эффекта на распределение зарядов на стержне.

Варьируются следующие параметры стержней:

- форма поперечного сечения стержня (круг, квадрат, шестиугольник, восьмиугольник);

- характерный размер поперечного сечения от 10 мм до 60 мм;

- форма вершины (срез под прямым углом, конусообразный - только для стержней кругового сечения).

Моделирование осуществлено при использовании модуля AC/DC COMSOL Multiphysics: 2D / 3D axisymmetric \rightarrow AC/DC \rightarrow Electrostatics, Boundary Elements (*esbe*). Для круговых стержней расчеты проведены в двух режимах: 2D и 3D, что позволило оценить возможную погрешность реализации режима 3D, связанную со значительным числом узлов расчетной сетки, что позволило определить параметры сетки 3D модели для других вариантов стержней. Общее количество узлов сетки не превышало 10^6 . Расчеты проведены с использованием компьютера на базе четырехъядерного

процессора Intel Core i5 с ОЗУ 8 Гб. Целью моделирования является определение такого варианта сочетания параметров стержневого молниеприемника, при котором достигается максимальное значение «напряженного объема» при прочих равных условиях. В качестве иллюстрации, на рисунке 3.11 представлено распределение напряженности E -поля (рис.3.11а) и напряженный объем (рис.3.11б) в пространстве во круг стержня квадратного сечения.

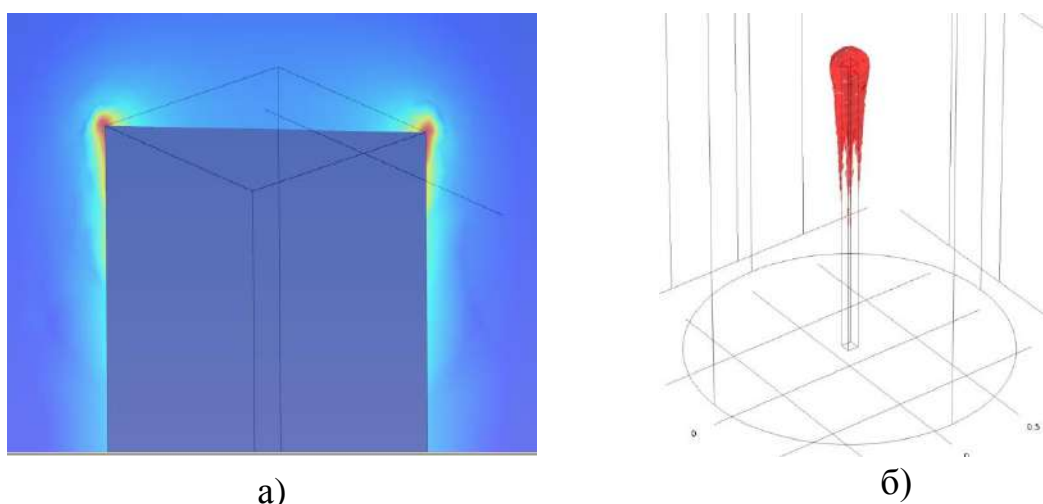


Рис. 3.11 - Распределение напряженности E -поля в пространстве у стержня квадратного сечения

Для количественной оценки величины «напряженного объема», исследовано распределение напряженности электрического поля в области вершины стержня. Площадь поперечного сечения каждого стержня принята равной 144 мм^2 . Верхняя пластина находится под потенциалом $U = 2,5 \text{ МВ}$, нижняя заземлена ($U = 0$). Расстояние (H) между пластинами 5 м . Длина стержня (h) выбрана равной 2 м . Стержень устанавливается на нижней пластине с обеспечением гальванического контакта. Рассмотрены такие пять форм поперечного сечения стержней:

- квадрат, плоская вершина;
- шестигранник, плоская вершина;
- круг, плоская вершина;
- круг, заостренная вершина конус 1: 3;
- круг, заостренная вершина конус 1: 5.

Результаты расчетной оценки величины «критического объема», в котором напряженность электрического поля равна или превышает 30 МВ/м, представлены в табл. 3.3. Видно, что по этому критерию, стержень квадратного сечения с плоской вершиной имеет явное преимущество.

Таблица 3.3 - Результаты расчетной оценки величины «критического объема»

Форма сечения	Размеры поперечного сечения, мм	Вершина стержня	Напряженный объем, мм ³
квадрат	12x12	плоская	4420
шестигранник	«а-б»=7.4448	плоская	2295
круг	R=6.77	плоская	2158
круг	R=6.77	конус 1:3	186.6
круг	R=6.77	конус 1:5	130.0

При математическом моделировании с целью определения зависимости напряженности электрического поля на кромке торца стержня, установлено, что с уменьшением радиуса стержня (следовательно, площади торца) растет напряженность электрического поля на его поверхности. Для иллюстрации, на рисунке 3.12, показана зависимость для круглого стержня. Кроме того, вследствие увеличения высоты стержня в диапазоне от 1 до 4 м линейно растет максимальное значение напряженности электрического поля на торце. Обобщенная функциональная зависимость хорошо (с погрешностью менее 5%) описывается эмпирической формулой (3.2).

$$E_m(h, r)/E_0 = 45,0 h g [1 - 0,11(r-2)] \quad (3.2)$$

где: $E_m(h, r)$ - максимальное значение напряженности Е-поля на ребре стержня, В/м; E_0 - напряженность действующего электрического поля, В/м; h - высота стержня, м (в пределах от 1 м

до 4 м); r - радиус стержня, см (от 1 см до 6 см), g - коэффициент влияния формы сечения ($g = 1$ для круга; 1,3 для 6-гранника, 1,5 для квадрата).

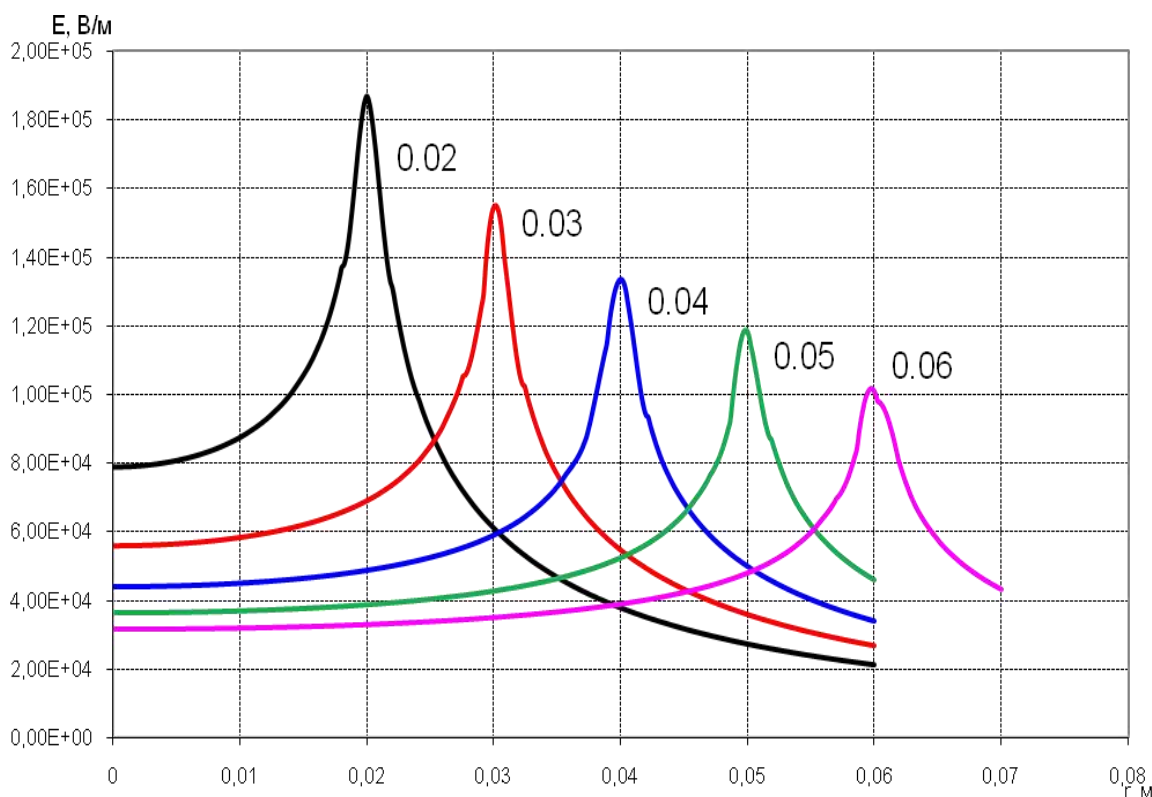


Рис. 3.12 - Графики напряженности E -поля на поверхности торца круглого стержня в зависимости от величины радиуса стержня ($h = 2$ м; $h/H = 0,4$; $E_0 = 2$ кВ/м)

Эта формула позволяет определить необходимую высоту стержня для появления коронного разряда при нахождении в электрическом поле заданной напряженности.

Для реализации экспериментальных исследований разработан и создан высоковольтный испытательный стенд (ВВС-1.2). В состав ВВС-1.2 входят: силовой распределительный шкаф; пульт управления; автотрансформатор; повышающее-выпрямляющее устройство; генератор импульсного напряжения (ГИН) 1.2 МВ; генератор импульсных токов 100 кВ/70 кА; универсальный блок поджига; формирующее устройство; система полеобразования; измерительный комплекс. Общий вид части комплекса приведен на рис.3.13.

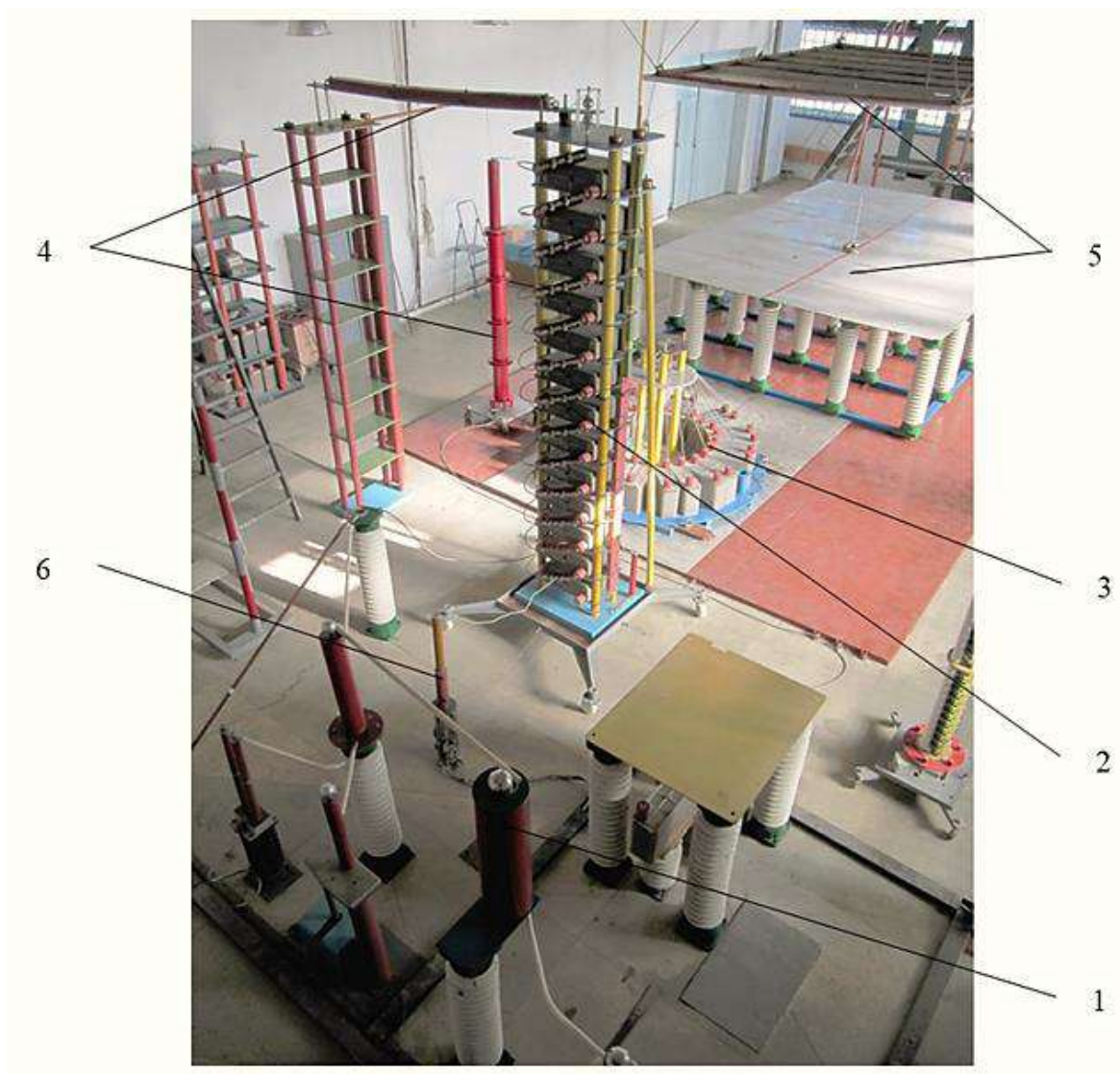


Рис. 3.13 – Испытательный стенд ВВС-1.2

- 1 - повышающее-выпрямляющее устройство ПВУ-1;
- 2 - генератор импульсного напряжения;
- 3 - генератор импульсных токов; 4 - формирующее устройство;
- 5 – система полеобразования в виде полосковой линии (ПЛ);
- 6 - универсальный блок поджига.

При проектировании ГИН 1.2 учтено максимальное значение выходного напряжения (1,2 МВ), которое ограничено расстоянием до окружающих элементов зала. ГИН 1.2 предназначен для генерирования грозовых и коммутационных импульсов напряжения.

В состав разрядного контура ГИН-1.2 входят 13 каскадов, каждый из которых образован конденсатором типа ИК 100-0.4, многозазорным воздушным коммутатором МЗК-100, двумя зарядно - разрядными резисторами (каждый 60 кОм), набранными из резисторов типа ТВО и двумя демпфирующими резисторами.

Демпфирующие резисторы изготовлены из нихромовой ленты, уложенной зигзагообразно с изоляционными прокладками и залитой эпоксидным компаундом. Величина сопротивления каждого резистора 2,5 Ом. Запуск ГИН осуществляется подачей пускового импульса на средний электрод первого коммутатора. Основные выходные параметры ВВС-1.2 по формированию импульсного напряжения приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 - Выходные параметры ВВС-1.2

Название параметра или характеристики	Значение	Форма импульсов напряжения
Амплитуда грозового импульса напряжения, кВ	250 - 1000	
Длительность фронта грозового импульса напряжения, мкс	$1,2 \pm 0,36$	
Длительность на полуспаде грозового импульса напряжения, мкс	$50 \pm 10,0$	
Амплитуда апериодического коммутационного импульса напряжения, кВ	250 - 1000	
Длительность фронта апериодического коммутационного импульса напряжения, мкс	250 ± 50	
Длительность на полуспаде коммутационного импульса напряжения, мкс	2500 ± 750	

Габаритные размеры и электрические характеристики ВВС-1.2 в полной мере соответствуют требованиям стандарта NF C 102-17:2011, для сертификации ESE терминалов, что подтверждено внешним аудитом иностранных заказчиков. Стандарт предусматривает подачу постоянного электрического поля, напряженность которого находится в пределах от 20 кВ/м до 25 кВ/м. Это требование моделирует обстановку, которая, по мнению авторов стандарта, присуща условиям развития молнии. Нами исследован значительно более широкий диапазон от 1 кВ/м до

100 кВ/м, что обеспечило получение дополнительных результатов относительно параметров коронного разряда.

Исследование проведено на десяти образцах стержней, отличающихся формой сечения, размерами и формой вершины. Варьируемые характеристики стержневых молниеприемников представлены в таблице 3.5. Стержни размещались между двумя параллельными металлическими плоскостями, с размерами: нижняя 4,02 x 6,56 м, верхняя 3,63 x 5,22 м. В этом варианте нижняя плоскость была заземлена. Верхняя плоскость - потенциальная, на нее подавалось высокое напряжение (ВН) обеих полярностей до 150 кВ. Расстояние между плоскостями (H) установлено 2,20 м. Стержни имели одинаковую длину - 0,75 м и размещались на изолирующей подставке. Длина воздушного промежутка между вершиной стержня и верхней плоскостью - 1,3 м (погрешность менее ± 1 мм).

Таблица 3.5 Характеристики образцов стержней

№ стержня	Название	Материал	Размеры поперечного сечения, мм	Вершина стержня
1	квадрат	сталь	12	плоская
2	квадрат	сталь	16	плоская
3	шестигранник	сталь	12	плоская
4	шестигранник	сталь	19	плоская
5	круг	сталь	Ø12	плоская
6	круг	сталь	Ø22	плоская
7	круг	Д16	Ø10	плоская
8	круг	Д16	Ø20	плоская
9	круг	Д16	Ø10	конус
10	круг	Д16	Ø20	конус

Параметры тока короны регистрировались с помощью коаксиального шунта ШК-50 ($R_{ш} = 50$ Ом) и цифровых осциллографов типа Tektronix TDS, соединенных коаксиальным радиочастотным кабелем типа РК-50 длиной 30 м. Время переходной характеристики ШК-50 не превышает 2 нс.

При плавном поднятии напряжения на потенциальной плоскости фиксировался момент появления импульса стримерной вспышки на экране осциллографа. Чувствительность измерительной

системы позволяла регистрировать сигнал, уровень которого превышает 5 мВ, что соответствует величине силы тока более 0,1 мА. Поэтому токи «тихой» короны не влияли на результаты исследований. В качестве примера, на рис. 3.14 и 3.15 представлены осциллограммы характерных всплесков тока короны (стримерных вспышек) для молниеприемника №5 круглого сечения диаметром 12 мм с плоской вершиной. Корона возникла при напряжении 92 кВ (при этом напряженность электрического поля составляет 41,8 кВ/м), амплитуда единичного всплеска составляет 46,5 мА.

На рис. 3.14 а представлен единственный стример, а на рис. 3.14 б - осциллограмма последовательности стримеров со временем прохождения 1 с при критическом значении напряжения.

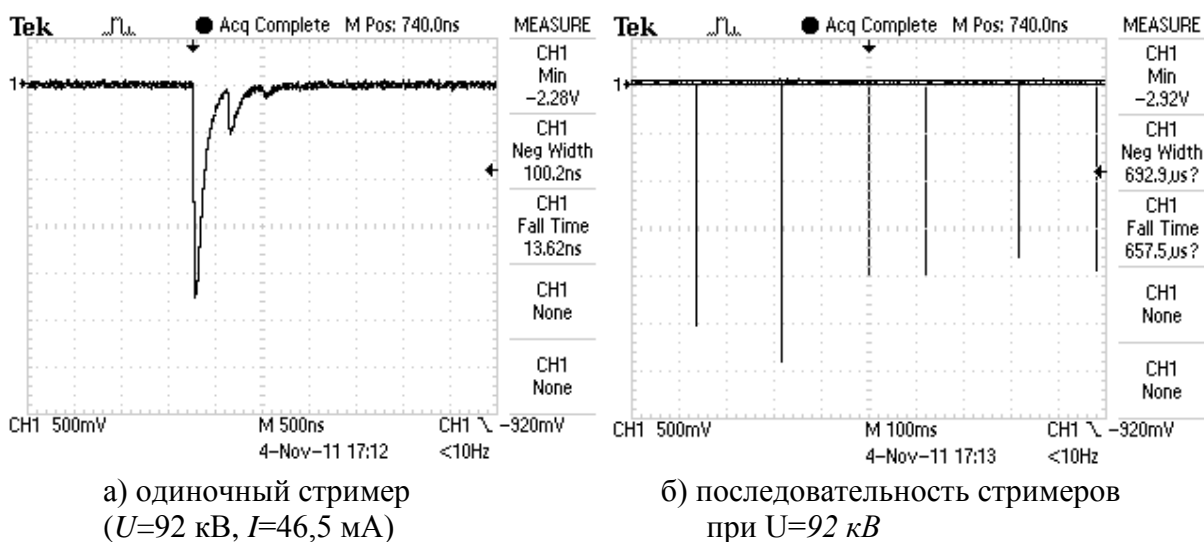


Рис. 3.14 - Характерные осциллограммы стримерных вспышек

На рис. 3.15а представлена осциллограмма сканирования в течение 1 с при напряжении 100 кВ и на рис. 3.15б - осциллограмма сканирования за 1 с при напряжении 140 кВ.

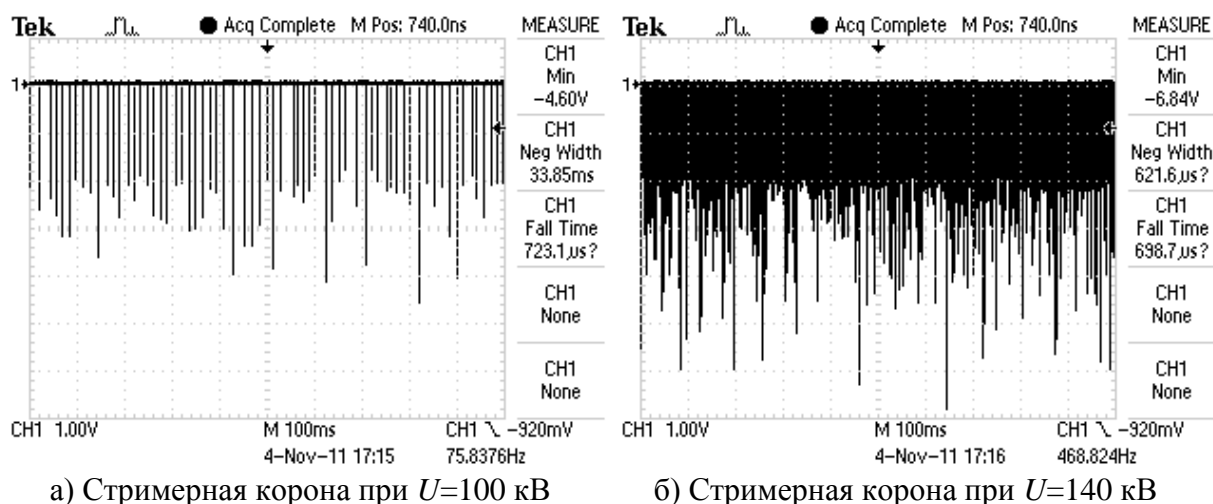


Рис. 3.15 - Осциллограммы развитой короны в зависимости от уровня напряжения

Аналогичные осциллограммы были получены для всех образцов молниеприемников, указанных в табл. 3.4. Для каждого образца набрана статистика из шестнадцати измерений. Частота появления импульсов тока определялась осциллографом благодаря использованию специальной опции. В табл. 3.6 представлены результаты статистической обработки для варианта отрицательной полярности потенциального электрода. Анализ результатов показывает, что для стержней с конусообразной вершиной (№9 и №10) возникновение стримерных вспышек наблюдается при напряженности электрического поля около 10 кВ/м. При этом, сила тока составляет единицы миллиампер. Важно отметить, что для стержней №9 и №10 с заостренной вершиной по мере поднятия напряжения наступает момент, когда процесс образования импульсной короны прекращается. В проведенных экспериментах это происходит при напряжении 100 кВ (45,4 кВ / м). Эффект имеет прямое следствие с образованием облака электронов, которое экранирует внешнее электрическое поле. Естественно, что в случае точечного источника короны, экранирование весьма эффективно. Такой, в общем-то очевидный вывод, привел к мысли о целесообразности обеспечивать развитую линию короны молниеприемника, что эффективно реализуется на квадратном стержне с плоской вершиной.

Таблица 3.6 - Сила тока единичного стримера при появлении стримерной короны

№ стержня	Напряжение на потенциальном электроде $U_{кр}$, кВ	Амплитуда силы тока единичного всплеска, мА	Падение напряжения на шунте, В	$E_{кр}$, кВ/м
1	78	26,8	1,34	35,45
2	84	27,2	1,36	38,18
3	80	28	1,4	36,36
4	96	30,4	1,52	43,64
5	92	45,6	2,28	41,82
6	122	52,8	2,64	55,45
7	80	38,4	1,92	36,36
8	112	48,4	2,42	50,91
9	20	1,72	0,086	9,09
10	24	3,12	0,156	10,91

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований, сформулирована гипотеза о возможности создать устройство предупреждения о появлении молнии на эффекте короны. Гипотеза базируется на следующих фактах: установлено, что сила тока каждого стримера для диапазона напряженности поля от 5 кВ/м до 40 кВ/м и длины стержня от 1 м до 4 м меняется не более чем на 50%, а временные параметры менее чем на 30%, при этом наблюдается однозначная зависимость количества стримеров за единицу времени от уровня напряженности электрического поля. Установлено, что появление стримеров начинается при достижении напряженности электрического поля конкретного значения, которое зависит от формы сечения стержня, формы его вершины и длины. Но, для конкретного стержня все параметры достаточно стабильны. Кроме того, предусматривается установление сенсоров тока молнии с учетом вероятности поражения объекта, что принципиально расширяет информационную базу для прогнозирования. Предложенный подход дает возможность создать национальную сеть прогнозирования грозовой активности за счет объединения тысяч, или даже десятков тысяч локальных систем через Интернет и сотовой связи. При проектировании локальной системы для конкретного использования целесообразно применять предварительную расчетную оценку вероятности попадания в

элементы объекта с использованием статистического метода [3.25]. Это позволит оптимизировать места установки сенсоров для получения наиболее достоверной информации о грозовых процессах.

Учитывая данные таблицы 3.6, в качестве чувствительного элемента системы предупреждения избран стержень кругового сечения диаметром 10 мм. С целью обобщения результатов исследования зависимости частоты импульсов коронного разряда от основных параметров процесса использован метод планирования многофакторного эксперимента. Избрано построение ортогонального центрально-композиционного плана (ОКЦП) трехфакторного эксперимента:

Целевая функция: Частота следования стримеров (количество в секунду).

В качестве входных переменных выбраны следующие: h - высота стержня (диапазон от 2м до 5м; E_0 - напряженность электрического поля (от 5 кВ/м до 20 кВ/м), с учетом того, что при $E \leq 3$ кВ / м импульсы не возникают; k - безразмерная величина, отношение высоты острия к радиусу круглого стержня (диапазон от 3 до 5).

Осуществлено планирование и проведена обработка результатов полного факторного эксперимента типа ПФЭ 2^3 для 8 точек плана и сформулирована линейная модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.3)$$

Для проверки однородности оценок результатов испытаний использован критерий Кохрена, для случая одинакового количества параллельных опытов (два) во всех точках плана. Расчетное значение критерия $G_p = 0,369$. Табличное критическое значение G_p по распределению Кохрена для уровня значимости $\alpha = 0,05$; количество степеней свободы $f_\Sigma = 8$; проходов 2 ($f_u = 1$), следовательно $G_{таб} = 0,68$. В соответствии с результатом, $G_p < G_{таб}$, что свидетельствует о том, что дисперсии однородны. Поэтому, результаты измерения отклика во всех точках плана равнозначные (все порядковые дисперсии относятся к одной генеральной совокупности).

Выполнение требования однородности порядковых дисперсий позволяет определить дисперсию воспроизводимости (оценки генеральной дисперсии) как среднюю арифметическую порядковых дисперсий. Результаты расчета коэффициентов линейной модели (3.3) приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 - Результаты расчета b - коэффициентов модели

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
2331,563	367,6875	1755,313	213,0625	-8,3125	21,4375	102,5625	11,6875

Проверку значимости b - коэффициентов выполнено при использовании t -распределения. Рассчитано $b_{кр} = t_{tab} S_{bi}$, где t_{tab} - параметр для t - распределения с соответствующими степенями свободы ($f_{\Sigma} = 8$), уровнем значимости ($\alpha = 0,05$): $t_{tab} = 2,306$; S_{bi} - среднее квадратическое отклонение b - коэффициентов:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{nN} = \frac{2438}{2 \cdot 8} = 152; \quad (3.4)$$

$$\sqrt{S_{bi}^2} = \sqrt{152} = 12,3; \quad (3.5)$$

где n - количество параллельных опросов; N - количество комбинаций (опытов).

Таким образом, полученное значение $b_{кр} = 28,5$. Если $|b_i| \leq b_{кр}$, то соответствующий коэффициент не является значимым и его можно не учитывать. В результате, уравнение регрессии в кодированных переменных имеет вид:

$$y = 2331 + 367x_1 + 1755x_2 + 213x_3 + 102x_2x_3 \quad (3.6)$$

Проверка адекватности модели выполнена по критерию Фишера. Проверка показала, что $F_p = 1,45 < F_{кр} = 4,07$, и с надежностью $p = 1 - \alpha = 0,95$ модель следует признать адекватной экспериментальным данным. Переход к физическим переменным сделано путем подстановки в (3.6) кодированных значений (3.7):

$$x_1 = \frac{H-3}{0,41}, \quad x_2 = \frac{E_0-13}{5,8}, \quad x_3 = \frac{k-4}{1}. \quad (3.7)$$

Окончательно, эмпирическая формула, которая определяет зависимость частоты стримеров от параметров задачи, имеет такой вид (3.8):

$$F_s = -4225 + 896 h + 231,9 E_0 - 16,8 k + 17,6 k E_0 \quad (3.8)$$

Область действия формулы (3.18) ограничена диапазонами входных переменных параметров: h - высота стержня (диапазон от 2 м до 4 м); E_0 - напряженность электрического поля от 5 кВ/м до 25 кВ/м); k - безразмерная величина, отношение высоты острия к радиусу круглого стержня (диапазон от 3 до 5). Более подробно с результатами можно ознакомиться в диссертационной работе А.Ю. Чернухина [26].

Полученные результаты использованы при создании образцов устройств предупреждения о грозовой опасности (X1, ML-FCSH, TWS-KS) функционирующих без всякого подвижного элемента, что качественно отличает от известных устройств с электрической «мельницей» и микроэлектромеханических сенсоров. Определение уровня опасности осуществляется по рекомендациям стандарта МЭК 62793: 2016 для устройств типа FSM (Field strength meter): уровень представления сигнала опасности при достижении напряженности электрического поля (7-10) кВ/м, рекомендуемый диапазон измерения ± 20 кВ/м.

3.5 Предложения по созданию локальной системы предупреждения о грозовой опасности

Следует отметить, что даже в странах, обладающих разветвленной сетью пунктов метеонаблюдения гроз, отсутствует сеть систем локального предупреждения грозовой опасности, для конкретно-ограниченных, экологически и стратегически важных мест.

Таким образом, создание системы предупреждения с высокой степенью вероятности об опасности разряда молнии между облаком и землей в конкретном месте в определенное время, основанной на

мониторинге электромагнитных полей атмосферы, до настоящего времени остается актуальной и практически важной задачей.

Как показывает анализ, в начальной стадии развития грозových явлений внутриоблачные разряды носят мелкомасштабный характер. При этом длительность пакета импульсов составляет 10–15 мс с частотой следования 3–4 импульса в минуту. По мере развития конвективного облака происходит постепенный рост плотности объемных зарядов и усиление грозовой активности. Продолжительность предгрозового состояния по времени может достигать 16 минут, со средним значением 8 минут [3.27, 3.28]. В 75 % случаев продолжительность предгрозового состояния облака находится в интервале от 3 до 10 минут. И если за 14–16 минут облако не переходит в грозовое состояние, то оно, как правило, распадается [3.29]. Таким образом, регистрация и идентификация межоблачных разрядов позволяет обеспечить временной интервал в 10 мин. до первого опасного разряда типа «облако-земля», что дает возможность реализовать систему раннего предупреждения о грозовой опасности. Поэтому, именно предразрядные межоблачные явления наиболее предпочтительны в качестве основы для разработки системы раннего предупреждения грозовой опасности.

Повышение достоверности прогноза грозовой опасности требует обработки разнородной информации, отличающейся как по форме, так и содержанию. Обычно такие данные поступают в результате съема оперативной информации о результатах инструментальных измерений с последующей ее обработкой в реальном масштабе времени. При этом осуществляют пространственную привязку получаемых данных, что обеспечивает полноту, наглядность и оперативность их представления. Сопряжение разнородной информации из одного или нескольких однотипных / разнотипных источников в каждой точке заданного региона является исходным массивом данных и начальным этапом комплексного анализа информации, в котором применимы различные методы математической обработки данных.

Формальная постановка задачи оптимального синтеза системы раннего предупреждения грозовой опасности (РПГО) заключается в том, что необходимо найти такой вектор параметров \vec{z}_{opt} при котором [3.30]:

$$\vec{z}_{opt} = \underset{\vec{z} \in Z_{don}}{extr} E(\vec{z}) \quad \text{при,} \quad \vec{y}(\vec{z}) \in Y_{don},$$

где \vec{z}_{opt} – вектор параметров системы; Z_{don} – множество допустимых значений параметров; $E(\vec{z})$ – критерий эффективности системы, экстремум которого необходимо обеспечить выбором соответствующего вектора параметров; $\vec{y}(\vec{z})$ – вектор показателей качества системы; Y_{don} – множество допустимых значений показателей качества.

В случае представления системы в виде совокупности независимых блоков, решение многомерной задачи сводится к решению нескольких одномерных задач. Однако, использование распределенного программного обеспечения в системе РПГО делает данный подход неприемлемым. Это обусловлено наличием сильных взаимных влияний подсистем, а также зависимостью характеристик одних подсистем от параметров других. Таким образом, следует выявлять функциональные зависимости критерия эффективности и показателей качества системы от технических параметров всех ее подсистем. Причем, задачу оптимального параметрического синтеза системы РПГО следует решать, как многомерную задачу, что требует разработки соответствующих методов.

Общая схема системы РПГО [3.30] разработанной в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» представлена на рис. 3.16.

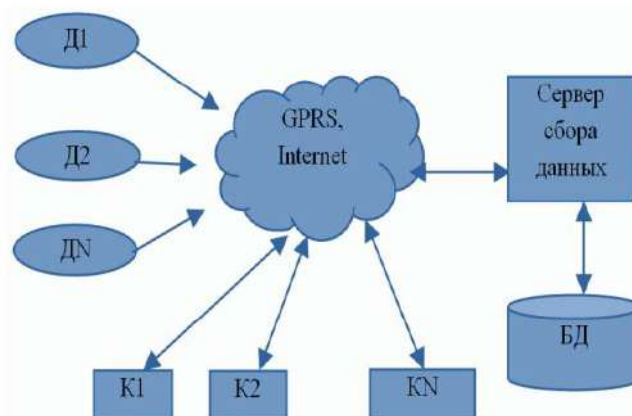


Рис. 3.16 - Общая схема системы РП
 Д1..ДN, – датчики электрического поля; К1...КN датчики магнитного поля.

Практическая реализация общей схемы системы РПГО, осуществляется посредством автономного модуля сбора, предварительной обработки и передачи информации (рис. 3.17).

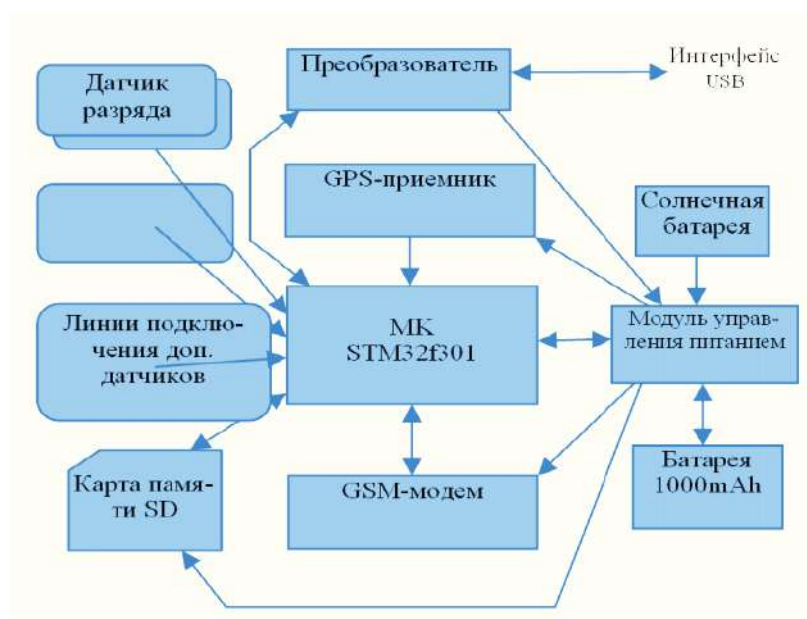


Рис. 3.17 – Общая структурная схема автономного модуля

Как следует из приведенной схемы, устройство содержит емкостные датчики разрядов, сигналы с которых поступают на вход АЦП микроконтроллера.

Так как импульсное электрическое поле, создаваемое межоблачными разрядами, может рассматриваться в качестве предвестников наиболее опасных последствий грозовых явлений для данного региона (в частности разрядов «облако-земля»), то именно по этому признаку и целесообразно осуществлять их идентификацию из общей массы электромагнитных излучений ближних и дальних грозовых разрядов для целей раннего предупреждения грозовой опасности региона.

Также дополнительным признаком является определение градиента электростатического поля в период предгрозовой активности, а началом отсчета является идентифицированный межоблачный грозовой разряд. Микроконтроллер STM32F301 с ядром ARM Cortex M4 блока предварительной обработки информации осуществляет оцифровку сигналов, поступающих с датчиков, формирует и отправляет на сервер информационный

пакет, в котором дополнительно вводится информация о его местоположении, уровне заряда батареи и времени отправки пакета.

Микроконтроллер работает на частоте 72 МГц. Синхронизация точного времени, и определение местоположения автономного модуля осуществляется с помощью встроенного приемника GPS, оснащенного пассивной твердотельной керамической патч-антенной [3.31]. Для хранения настроек и протокола работы в модуле предусмотрена энергонезависимая карта памяти объемом до 32 Гб стандарта Secure Digital. Автономная работа модуля обеспечена встроенной литий-ионной батареей, подзарядка которой осуществляется посредством солнечных батарей, размещенных на корпусе модуля. Созданный прототип автономного модуля на основе разработанной модели [3.30, 3.31] в процессе опытной эксплуатации подтвердил его ожидаемые технические характеристики.

В связи с тем, что система РПГО предназначена для работы в сложной электромагнитной обстановке, обусловленной грозовой деятельностью, она должна быть помехоустойчива. Причем, помехоустойчивость системы в основном определяется помехоустойчивостью канала связи. Передача информации от каждого из автономных модулей на сервер сбора хранения и интеллектуального анализа осуществляется с помощью системы мобильной связи стандарта DECT (Digital European Cordless Telecommunications) [3.32 – 3.36].

Передача связи в стандарте DECT – это механизм ухода от каналов, подверженных воздействию помех или каналов с низким уровнем сигнала. При этом за счет динамического выбора канала в каждый момент времени доступен любой из 120 дуплексных каналов. Пороговое отношение сигнал/помеха задано равным 10 дБ, исходя из вероятности ошибки $P_{ош}=10^{-3}$. Реализация стандарта предусматривает процесс постоянного сканирования доступных каналов и измерения уровня помех в них (Received Signal Stench Indication, RSSI).

Мощность помех в каналах измеряется не реже, чем 1 раз в 30 с. Благодаря этому осуществляется выбор наилучшего на текущий момент времени канала для передачи информации и реализация динамического выбора, исходя из оценки качества передачи информации. За счет динамического выбора и выделения канала автономный модуль может уходить от соединения, содержащего

помехи, организуя второе соединение. Причем, это соединение осуществляется либо с той же базовой станцией, либо с другой. Два радиосоединения временно поддерживаются параллельно.

По прошествии некоторого времени базовая станция определяет, у какого соединения лучшее качество и освобождает другой канал. Каналы с наибольшим значением уровня помех постоянно анализируются в автономном модуле с целью выявления принадлежности сигнала конкретной базовой станцией и организации связи с ней. Механизм динамического выбора и выделения канала гарантирует, что связь всегда устанавливается в наиболее защищенном от помех доступном канале. Таким образом, снижается вероятность потери информации и повышается достоверность прогноза.

Территориальное размещение автономных модулей осуществлено таким образом, что их зоны покрытия частично перекрываются и совпадают с зоной обслуживания базовой станции. Причем место размещения каждого конкретного модуля выбирают с учетом влияния на них окружающих сооружений и конструкций, вызывающих искажения реальных электростатических полей в месте его установки. Оценку конкретного влияния окружающих сооружений на электромагнитную обстановку в месте расположения автономного модуля осуществляют с помощью разработанного специализированного программного обеспечения [3.25].

Полученные данные позволяют вносить соответствующие коррективы в результаты измерения и повышать их достоверность. Информация с каждого модуля поступает на сервер сбора, интеллектуального анализа данных и хранения полученных результатов. Он реализован в виде WEB – сервера. Основной модуль сервера написан на языке PHP. Хранение данных осуществляется в базе данных под управлением СУБД MySQL. Программный модуль интеллектуального анализа и визуализации результатов анализа также выполнен на языке PHP. Модуль дает возможность представлять данные о текущей электростатической обстановке выбранного региона с наложением информации на географическую карту местности (рис. 3.18).

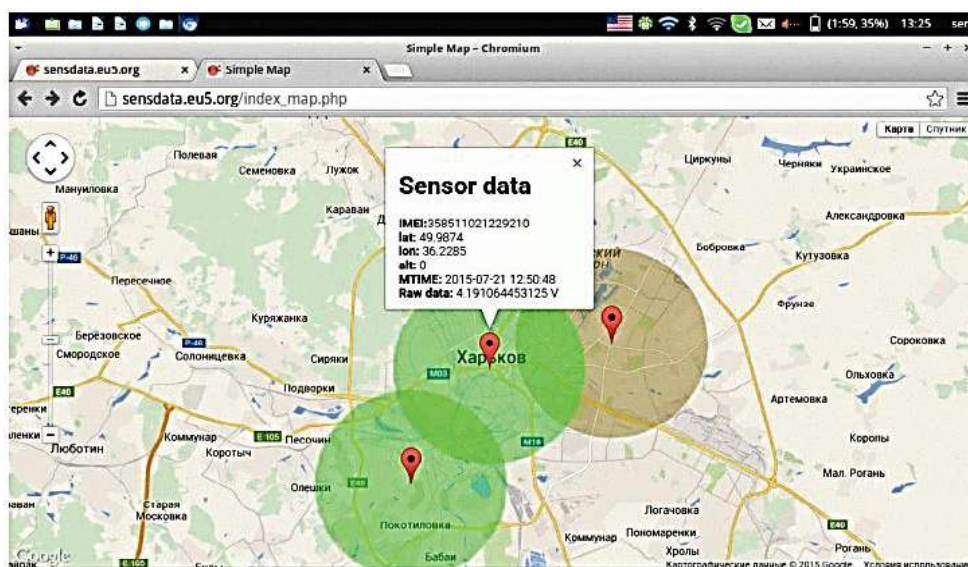


Рис. 3.18 – Визуализация электростатической обстановки

При этом осуществляется прогноз направления распространения грозового фронта с определением места и времени вероятного грозового разряда «облако-земля». Расширены возможности просмотра текущего состояния (рис. 3.19) и ретроспективной информации (рис. 3.20) по каждому из автономных модулей сбора и предварительной обработки информации.

Также при реализации данной системы предусмотрена возможность воссоздания осциллограмм процессов грозовых разрядов. С этой целью автономные модули, регистрирующие процессы изменения электрических полей во время грозового разряда, передают на сервер не видеоимпульс процесса, а его характерные параметры. Это амплитуда и длительность электрического поля разряда – две цифры.

Амплитуда электрического разряда оказывает определяющее влияние на восстанавливаемую деградацию элементной базы радиоэлектронной аппаратуры – зеенеровский пробой. А его длительность определяет невозстанавливаемую деградацию – тепловой пробой. Эти два критерия передаются на сервер в блок интеллектуального анализа данных. При этом используется предварительно заполненная база видеоданных о существующих грозовых процессах. По полученным критериям выбирается наиболее близкий процесс, который визуализируется. Такой подход позволил существенно разгрузить радиоканал связи между автономными модулями и базовыми станциями мобильной связи.

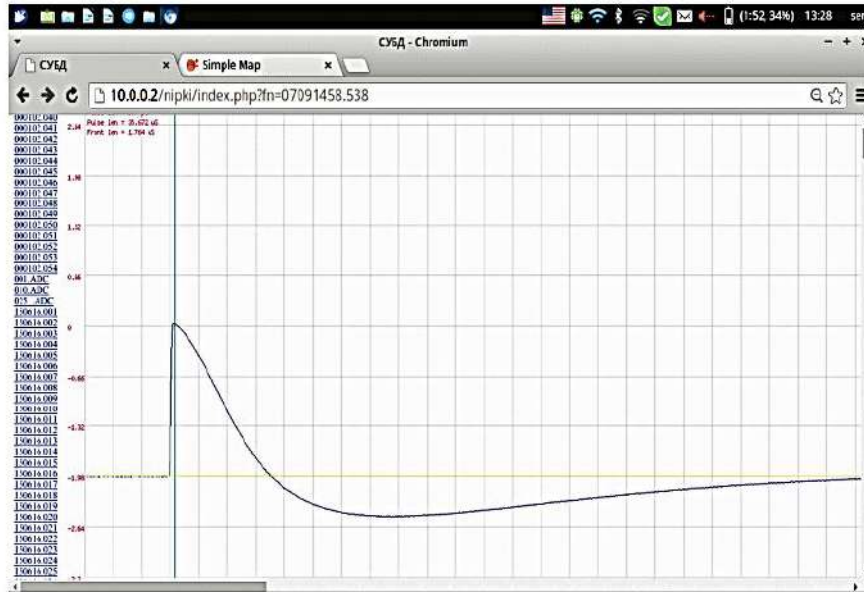


Рис. 3.19 – Просмотр осциллограмм разрядов

358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 12:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 11:50:46	5200
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 10:50:48	5198
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 09:50:47	5204
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 08:50:47	5082
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 07:50:48	5124
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 06:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 05:50:47	5200
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 03:50:45	5198
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 02:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 00:50:46	5106

Рис. 3.20 – Вид окна просмотра ретроспективной информации

Оптимальность принятых решений обычно оценивается с помощью критерия эффективности. Наиболее часто в качестве критерия эффективности используются критерий экономической эффективности, например, капитальные вложения в систему или приведенные затраты. Он является наиболее простым и дает

приемлемые практические результаты. Однако эффективность любой системы не сводится к ее экономической эффективности

В общем случае эффективность – это нормированный к затратам ресурсов результат действия системы на определенном интервале времени. Сравнивая затраты ресурсов на реализацию систем РПГО, использующих сеть радиолокационных станций или спутниковый мониторинг с предлагаемой системой, использующей существующую разветвленную сеть мобильной связи, можно сделать вывод о высокой экономической эффективности предлагаемых технических решений.

Таким образом, преимущества разработанного алгоритма позволяет осуществить распознавания и автоматизированный ввод в базу данных картографической информации и спутниковых карт, с наложением в динамическом режиме соответствующих зон измерения и их результатов. Причем, каждая из зон оттенена определенным цветом, характеризующим уровни грозовой опасности. Предложенный метод обеспечивает передачу на центральный компьютер с помощью системы мобильной связи распределенной информации о грозовой опасности с накоплением ее в базе данных. Созданная информационно-поисковая система, построена на запросах к базе данных, размещенной на сервере, доступ к которой осуществляется с любого компьютера, входящего в глобальную сеть.

3.6 Оборудование раннего предупреждения грозовой опасности

Разработанный и опробованный в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» прибор для предупреждения о грозовой опасности представляет собой автономный измеритель параметров тока короны со стержней (молниеприемников) в предгрозовой период главной стадии молнии, в основу работа которого положен коллекторный метод.

В данном устройстве был применен *коллектор, работающий по принципу коронного разряда*, начинающий действовать при сравнительно больших напряженностях поля (порядка 10^3 В/м), способных вызывать коронирование со стержней. В основном эти коллекторы используются только для оценки порядка величины

полей с напряженностью, большей той, при которой начинается процесс коронирования, и, как следствие, возникновение грозовой опасности.

Для создания локального средства раннего предупреждения о грозовой опасности (ЛСПГО) было предложено использовать существующие сети мобильной связи и сети интернет на основе двухуровневой системы (рис. 3.21) [3.37].

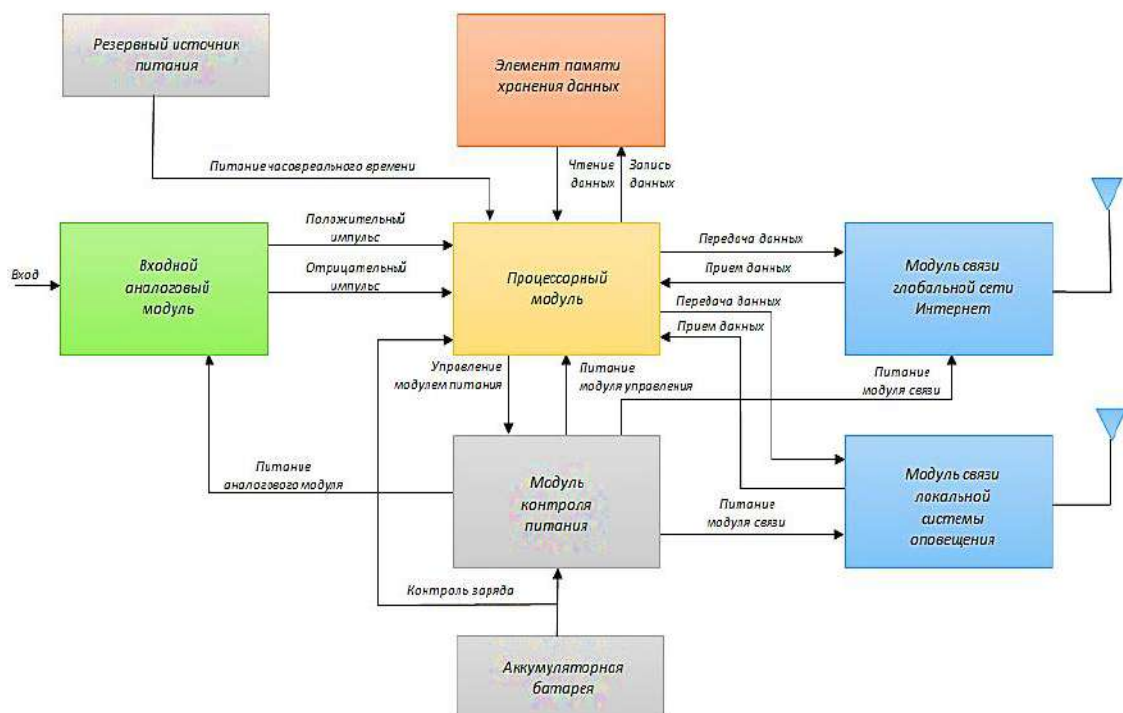


Рис. 3.21 - Структурная схема локального средства раннего предупреждения о грозовой опасности.

Первый уровень формирует тревожный сигнал в конкретном месте и передает информацию об этом на сервер. Его основу составляет индикатор ИКС-1, осуществляющий мониторинг изменения значения напряженности квазистатического электрического поля атмосферы.

Второй уровень (исследовательский) создается на базе комплекса датчиков импульсных электрических и магнитных полей, сопровождающих молниевые разряды. Он предназначен для уточнения корреляции между показаниями ИКС-1 и реальной грозовой обстановкой. Включает в себя автономные модули сбора информации обеспечивающий оцифровку данных, получаемых от

первичных преобразователей, и последующую передачу этих данных на сервер ЛСПГО.

Принцип действия индикатора грозовой опасности ИКС-1 основан на регистрации числа импульсов тока короны со стержневых молниеприемников. Формула 3.8 устанавливает зависимость числа импульсов от напряженности электрического поля, длины стрежня, формы его поперечного перереза и формы вершины. Исходная информация сразу представлена в цифре, которая позволяет практически без дополнительных усилий измерять скорость изменения напряженности электрического поля. Как преобразовательный элемент используется измерительный шунт, включенный в цепь заземленного стрежня, или пояс Роговского, что охватывает стержень. Применение пояса Роговского предпочтительно, поскольку позволяет использовать в качестве чувствительного элемента ИКС-1 огромное число уже существующих стержневых молниеприемников. Однако, при этом, в ряде случаев, возникают трудности с обеспечением достаточного уровня чувствительности, поскольку импульсы тока лежат в наносекундном диапазоне, а пиковое значение силы тока импульса может начинаться с десятков миллиампер. Аналоговая часть ИКС-1 выполнена на быстродействующих операционных усилителях компании Analog Devices AD8039 и AD8038. Два соединенных последовательно и каскадно-усиливающих амплитуду биполярных импульсов в 4 раза. После чего биполярные импульсы делятся на два канала отрицательных однополярных импульсов и конвертируются в импульсы Ttl-Уровня с помощью инвертора и триггеров Шмидта. Дальше импульсы с двух каналов поступают во вход счетчика, выполненного на микроконтроллере (МК) STM32F031 фирмы Stmicroelectronics.

Система базируется на концепции мониторинга напряженности электрического поля атмосферы с использованием сенсоров, функционирующих на эффекте коронного разряда с металлических стержней. Содержит металлический стержень, преобразователь импульсов тока в напряжение, электронный модуль анализа, устройство передачи данных по беспроводным каналам, устройство включения сигнала тревоги. Предупреждение о грозовой опасности осуществляется за 10-15 минут до возникновения разряда молнии в конкретном месте с вероятностью более 90%. Внешний вид устройства ИКС-1 представлен на рис. 3.22.

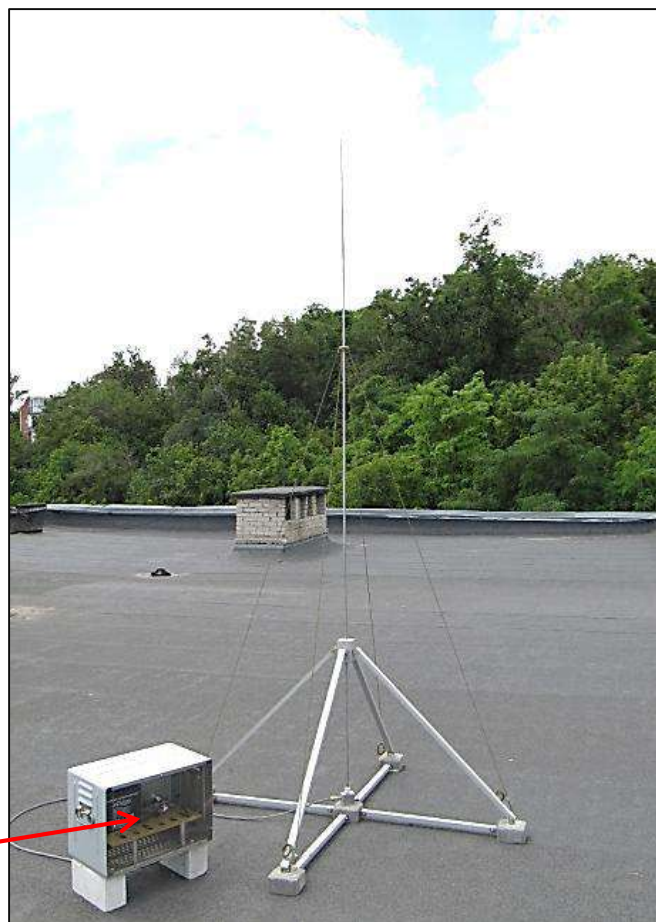


Рис. 3.22 - Внешний вид устройства ИКС-1

Осциллограммы электрических импульсных сигналов с преобразователя приведены на рис. 3.23.

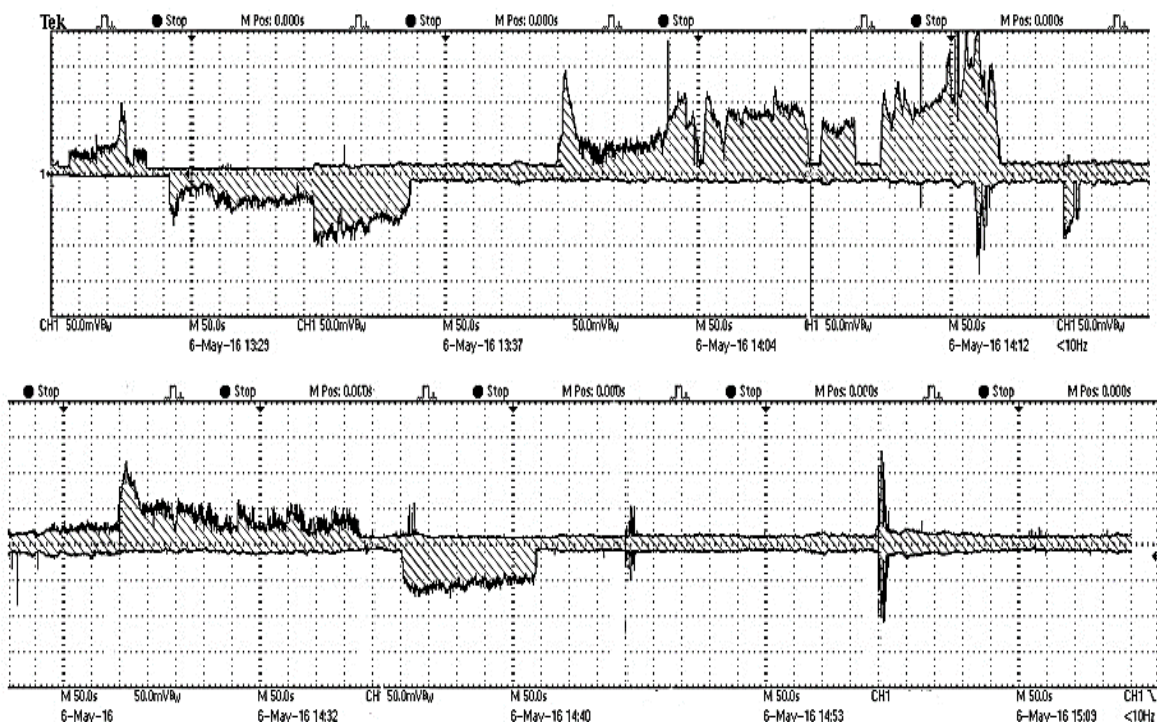


Рис. 3.23 – Осциллограммы импульсных сигналов с преобразователя ИКС-1

По сравнению с существующими в мире образцами индикаторов напряженности электрического поля атмосферы имеет следующие основные преимущества:

- получаемые результаты практически не зависят от давления, ветра и дождя;
- включение устройства осуществляется внешним источником – током короны, что не требует постоянно держать прибор в полностью включенном состоянии;
- приемное устройство в виде металлического стержня одновременно является широкополосной приемной антенной атмосфериков, что обеспечивает возможность слежения за грозовым фронтом на расстояниях до 200 км.

Такие системы отвечают современному мировому тренду соответствующему специализированному стандарту IEC 62793:2016 [3.1].

3.7 Компьютерная программа анализа и обработки данных при принятии решения о подаче сигнала грозовой опасности

Назначением компьютерной программы является реализация функций сервера и обработчика в системе сбора, регистрации и анализа данных с сенсоров электромагнитных полей молнии с целью определения оценок расстояния от блоков сенсоров к молнии.

До обрабатываемых программой данных относятся отсчеты следующих характеристик электромагнитных полей молнии:

- вертикальная компонента электрического поля молнии;
- горизонтальная компонента электрического поля молнии;
- две перпендикулярные составляющие горизонтальной компоненты магнитного поля молнии.

Программа обеспечивает возможность реализации перечисленных ниже функций:

- настройка параметров связи через интернет на основе протокола TCP/IP;
- настройка эталонных параметров молнии, используемых в процессе обработки, принятых от сенсоров блоков отчетов характеристик электромагнитных полей молнии;
- учет параметров регистрации и квантования по уровню реализованных в блоках сенсоров отчетов характеристик электромагнитных полей молнии;
- по запросу от клиента установления с ним связи через интернет на основе протокола TCP/IP;
- контроль количества клиентов, с которыми в каждый момент времени поддерживается связь;
- прием от клиентов пакетов данных, полученных от сенсоров блоков электромагнитных полей молнии;
- регистрация полученных пакетов данных в файле ведение журнала работы;
- выделение из принятых пакетов данных информации о зарегистрированных сенсорами отчетах обрабатываемых характеристик электромагнитных полей молнии;
- обработка выделенных данных о зарегистрированных сенсорами отчетах обрабатываемых характеристик электромагнитных полей молнии с целью определения оценок расстояния от блоков сенсоров до молнии;

- регистрация результатов определения оценок расстояний от блоков сенсоров молнии, полученных в процессе обработки полученных пакетов данных в файле ведение журнала работы.

3.8 Концепция построения алгоритма программы по использованию данных из одиночного пункта регистрации

Реализованную в программе вычислительную модель можно описать следующим образом.

От блоков датчиков поступают отсчеты характеристик, фиксируемых в тактовые моменты времени, то есть временной интервал между получаемыми отсчетами кратный интервала дискретизации (0,25 мкс). При этом неизвестно, через какой интервал от момента начала соответствующего импульса выполнено формирование первого отсчета в информационном пакете.

Кроме отсутствия информации о временном сдвиге отсчетов по отношению к моменту начала импульса, дополнительное влияние на отсчеты делают:

- расстояние до канала молнии;
- амплитуда тока молнии.

Идея алгоритма программы заключается в использовании зависимости форм импульсов электрического и магнитного полей, которые сопровождают разряды молнии, от расстояния до канала молнии. Для математического описания таких эталонных форм использованы формулы, приведенные в главе 2. Для расчета параметров электрического и магнитного полей использованы формулы (2.28 - 2.30). Поля в интересующей нас области на расстоянии (1 - 20 км), формируются в результате суперпозиции импульсных полей и полей ГЭМИ. Форма тока взята из рис. 2.16, а скорость распространения канала по рис. 2.17. Для общности можно использовать $E_{гор}$, формула 2.31. Проводимость земли выбрана переменной, начальное значение принято 10^{-2} См/м, что соответствует удельному сопротивлению 100 Ом·м.

Для определения оптимального количества выборки данных и принципа формирования пакета данных с точки зрения достоверности идентификации формы сигнала (с погрешностью не более 10 %) и минимизации объема трафика. Алгоритм программы идентификации базируется на сравнении формы сигналов электрического и магнитного полей, которые регистрируются

соответствующими датчиками с формами, которые определены эталонными для диапазона расстояния до канала молнии от 5 км до 20 км.

При этом, нежелательно ограничиваться только попыткой фиксации максимальных значений полей излучения молнии, а целесообразно также учитывать и форму импульса.

Для оценки дистанций в диапазоне 1 - 3 км, на которых могут наблюдаться импульсы вертикальной составляющей электрического поля с двумя локальными максимумами желательно иметь и их отсчеты, то есть их нужно включить в состав сообщения.

Кроме упомянутых проблем необходимо учесть, что кроме погрешностей измерений, обусловленных шумами, достаточно серьезный вклад вносят:

- неизвестность точного момента начала импульсного сигнала;
- погрешности дискретизации по времени;
- погрешности дискретизации по уровню сигнала.

Для оценки их влияния необходимо дополнительное время и точное знание вида опорной модели.

Анализ математических моделей, используемых для описания эталонных форм импульсов [см. главу 2], показал, что:

- при изменении расстояния до канала молнии меняется форма импульса;

- для одного и того же расстояния до канала молнии значение отсчета пропорционально амплитуде тока молнии.

Если взять отношение отсчетов для одних и тех же моментов времени, но для двух импульсов, которым соответствуют различные значения амплитуд тока молнии, то такие отношения будут в точности равны отношению этих амплитуд.

Если же отсчеты для одного импульса брать с некоторым временным сдвигом относительно отсчетов другого, то отношения будут меняться.

Аналогично, различия отношений между соответствующими отсчетами сравниваемых импульсов будут наблюдаться и в случае, когда сравниваемые импульсы соответствуют различным расстояниям до канала молнии. И предполагается, что эти различия значений отношений будут тем сильнее, чем больше временной сдвиг между сравниваемыми отсчетами и больше различие между истинным расстоянием до канала молнии и проверяемой расстоянием.

Таким образом, в качестве оценки степени расхождения результатов, сформированных на основе моделей, используемых для описания формы импульсов, с экспериментальными отсчетами было решено использовать дисперсию отношений для серий экспериментальных и проверяемых (сформированных на основе модели соответствующей характеристики) отсчетов.

Тестирование системы для оценки расстояний до места разряда молнии

Для выполнения оценки расстояния до эпицентра молнии переданные отсчеты должны содержать данные о:

- значении отсчета, который соответствовал началу регистрации импульса;

- времени и значения первого (а возможно, единого) локального максимума;

- времени и значении второго локального максимума (если он есть);

- времена и значения дополнительных отсчетов на интервале регистрации. Они должны обеспечить возможность оценки формы импульса.

Возможно, каждый локальный максимум придется характеризовать 3-мя отсчетами:

- непосредственно перед локальным максимумом;

- сам локальный максимум;

- непосредственно после локального максимума.

Алгоритм оценки расстояния до канала молнии включает следующие шаги:

- 1) за отсчетом принятого пакета определяются временные интервалы между отсчетами;

- 2) некоторым образом выбирается значение расстояния до канала молнии (R_{np}), которое проверяется;

- 3) устанавливается начальное значение сдвига модельных отсчетов по отношению к моменту начала импульса ($t_{нач}$);

- 4) с учетом п. 1 и $t_{нач}$ для расстояния R_{np} по модели соответствующей характеристики определяются значения отсчетов, которые проверяются;

- 5) вычисляется расхождение между сравниваемыми отсчетами;

- 6) на основании алгоритма поиска минимума расхождения значений $t_{нач}$ импульса оценивается необходимость дальнейшего

уточнения $t_{нач}$ с целью минимизации расхождения. Если степень локализации оптимального значения $t_{нач}$ недостаточна, то выбирается новое значение $t_{нач}$ и выполняется возврат к п. 4, иначе-переход к п. 7;

7) на основании алгоритма поиска минимума расхождения для значения $R_{пр}$ оценивается необходимость дальнейшего уточнения $R_{пр}$ с целью минимизации расхождения. Если степень локализации оптимального значения $R_{пр}$ недостаточна, то выбирается новое значение $R_{пр}$ и выполняется возврат к п. 3, иначе-переход к п. 8;

8) завершение алгоритма определения расстояния до канала молнии.

Анализ используемых моделей показывает, что максимумы характеристик достигаются в моменты времени, не превышающих 10 мкс, а момент регистрации первого импульса наступает гораздо раньше. Поэтому нахождение оптимального значения $t_{нач}$ выполняется в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-8} с, что обеспечивается шагами 3-6 приведенного выше алгоритма, реализующие обычный поиск минимума значения расхождения.

Описанный алгоритм реализован в прикладной программе «Дистанция» [3.38].

Анализ результатов использования программы, показал принципиальную возможность ее использования. Однако, в настоящее время, эффективность этого метода значительно уступает методу локации с помощью сети магнитных датчиков.

Литература к главе 3

- 3.1 IEC 62793:2016 Protection against lightning - Thunderstorm warning system.
- 3.2 IEC 62858:2019 (Ed.2) Lightning density based on lightning location systems - General principles. 20 p.
- 3.3 Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292с.
- 3.4 РД 34.21.122-87 Инструкция по молниезащите зданий и сооружений.
- 3.5 W.P. Roeder & T.M. McNamara. A Survey of the Lightning Launch Commit Criteria.- 45th WA. / https://www.researchgate.net/publication/242475772_A_Survey_Of_The_Lightning_Launch_Commit_Criteria.
- 3.6 Terrestrial Environment (Climatic) Criteria Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development. Revision NASA/TM—2008–215633, December 2008. D.L. Johnson, Editor. P. 860. Section 9: Atmospheric Electricity and Thunderstorm.
- 3.7 Francis J. Merceret, et al. A History of the Lightning Launch Commit Criteria and the Lightning Advisory Panel for America's Space Program. NASA/SP—2010–216283. - 250 P.
- 3.8 Vladimir Rakov. An Overview of the Performance Characteristics of Lightning Detection Systems / V Russian Conference on Lightning Protection // Invited presentation. St. Petersburg, Russia, May 16-19, 2016.
- 3.9 Amitabh Nag. Lightning Locating Systems: Characteristics and Validation Techniques / Amitabh Nag, Martin J. Murphy, Wolfgang Schulz, Kenneth L. Cummins // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.- p.824-836.
- 3.10 Базелян Э.М. Эффект объемного заряда короны в молниезащите / Э.М. Базелян // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. Санкт - Петербург, 27 - 29 мая 2014 .- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2014. – с.1-16.
- 3.11 Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology, 1st Edition / B. Bhattacharyya / Production Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata, 2015.
- 3.12 Riehl P. S. High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor solidstate sensor / P. S. Riehl, K. L. Scott, R. S. Muller, R. T. Howe // Proc. Actuator and Microsystem Workshop, 2002, pp 305–308.
- 3.13 Zhaoying Z. Microsystems and nanotechnology / Z. Zhaoying, W. Zhonglin, L. Liwei // Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, pp 221-228.

3.14 Wan-Chun Chuang. Review on the Modeling of Electrostatic MEMS / Wan-Chun Chuang, Hsin-Li Lee, Pei-Zen Chang, Yuh-Chung Hu // Sensors 2010, 10, 6149-6171; doi:10.3390/s100606149.

3.15 Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. №1. С. 2–11.

3.16 Князев В.В. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2012. – Вып. 21.-с.111-117.

3.17 Князев В.В. Сравнение характеристик эталонных образцов стержневых молниеприемников / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958) –с. 84-89.

3.18 Князев В.В. Корреляция силы тока коронного разряда стержневого молниеприемника и напряженности изменяющегося электрического поля / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2013. – Вып. 27 (1000). –с.155-162.

3.19 Князев В.В. Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2013. – Вып. 60 (1033).-с.122-126.

3.20 Чернухин А.Ю. Параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле / А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2014. – Вып. 50 (1092). –с.155-160.

3.21 Князев В.В. Составляющие неопределенности вольт-секундной характеристики электрического пробоя длинного воздушного промежутка / В.В. Князев, А.Ю. Чернухин // Системи обробки інформації. – 2014. – Вып. 3(119).-с.86-89.

3.22 Чернухин А.Ю. Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев // Вестник НТУ “ХПИ” «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Вып. 20. – 2015. С.149-155.

3.23 Чернухін О.Ю. Стримерная корона со стержневых молниеприемников / О.Ю. Чернухін, В.В. Князев // Eastern European Scientific Journal, №6, 2016, Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe.- Poland.- p.39-46.

3.24 Чернухин А.Ю. Влияние параметров коронного разряда на эффективность элементов систем молниезащиты / А.Ю. Чернухин // Електротехніка і електромеханіка. 2017, вып.3.-с.47-56.

3.25 Дронов В.М., Князев В.В. Комп'ютерна програма «Розрахунок ймовірностей рівнів блискавкозахисту будівель та споруд об'єкту («Захист»)» – Зареєстровано у Державній службі інтелектуальної власності України, реєстраційний №60092 від 09.06.2015.

3.26 Чернухин А.Ю. Коронний розряд зі стрижневих блискавкоприймачів в умовах дії сильного електричного поля від грозової хмари. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Харків, ХПІ, 2020.

3.27 Семенов К.А. Соотношение между числом внутриоблачных разрядов и разрядов на землю / К.А. Семенов // Тр. ГГО. – 1967. – Вып. 204. – С. 68-69.

3.28 Mac Gorman D. Improved timeliness of thunderstorm detection from mapping a larger fraction of lightning flashes / D. Mac Gorman, I. Apostolakopoulos, A. Nierow, M. Murphy, N. Demetriades, J. Cramer, P. Krehbiel // Lightning Imaging Sensor. Intl. Workshop, 11–14 September, Huntsville, Ala., Univ. Of Ala. Huntsville and National Space Science and Tech. Center, 2006.

3.29 Аксенов С.А. Автоматизированный анализ и прогноз опасных явлений погоды на основе таксономического сопряжения радиолокационной и другой информации / Дисс. на соискание степени канд. физ.-мат. наук / г. Нальчик, 2009.

3.30 Серков А.А. Система раннего предупреждения грозовой опасности / А.А. Серков, С.А. Никитин, В.В. Кравченко, В.В. Князев // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений», Вып. 51, 2015.- с.95-99.

3.31 Серков А.А. Гибридная модель модуля управления когнитивной самоорганизующейся сети базовых станций / А.А. Серков, И.И. Обод, С.А. Никитин // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. – 2013. – № 15 (158). Вып. 27/1. – С. 228–232.

3.32 Климаш М.М. Технології мобільного зв'язку / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич// – Львів, 2007. – 615 с.

3.33 Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев // – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.

3.34 Alazemi H.M.K. Stochastic modeling and analysis of 802.11 DCF with heterogeneous non-saturated nodes / H.M.K. Alazemi, A. Margolis, J. Choi, R. Vijaykumar, S. Roy. – Computer Communications. – 2007. – Vol. 30, No. 18. – P. 3652-3661.

3.35 Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополненное / И. В. Шахнович // – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.

3.36 Серков О.А. Комбіновані методи множинного доступу у телекомунікаційних мережах / О.А. Серков, І.І. Обод, С.О. Нікітін // Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 6 (113).

3.37 Постельник И.А. Сравнительный анализ средств измерения электростатического поля в атмосфере в предгрозовой обстановке / И. А. Постельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 87-91.

3.38 Дронов В.М., Князев В.В. Комп'ютерна програма «Оцінка відстані до каналу блискавки за результатами вимірювання амплітудно-часових параметрів імпульсних електричного і магнітного полів («Дистанція»)» – Зареєстровано у Державній службі інтелектуальної власності України, реєстраційний №70340 від 07.02.2017.

Кравченко В.І., Князев В.В.

К78 Блискавка та літальні апарати. В трьох томах, Том 1. Природа грозових явищ. / В.І. Кравченко, В.В. Князев. -Харків: Видавництво "НТМТ", 2020.- 253 с.. – Рос. мов.

Розглянуто процеси формування грозових явищ і дана сучасна класифікація видів блискавок. Містяться матеріали щодо визначення параметрів грозової електромагнітної обстановки і номенклатури зовнішніх факторів електромагнітного поля грозових розрядів, які надають вражаючий вплив і дестабілізуючу дію на літальні апарати. Представлена інформація о системах предупреждения о грозовой опасности и ее элементах.

Для інженерно-технічних працівників, які розробляють та експлуатують літальні апарати і студентів відповідних спеціальностей. Також книга може бути корисна широкому колу читачів.

Лл. 121 Табл. 17. Бібл.: 141 назв.

Наукове видання

КРАВЧЕНКО Володимир Іванович
КНЯЗЄВ Володимир Володимирович

БЛИСКАВКА ТА ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ

Монографія в трьох томах
Під загальною редакцією проф. В. І. Кравченко

Том 1

Природа грозових явищ
(російською мовою)

Під. до друку 20.05.2021. Формат 60x84 1/16.
Надруковано на цифровому видавничому комплексі
Rank Xerox Docu Tech 135. Умов. друк. арк. 13,625.
Наклад. 300 прим. 1-й завод. 1-100.
Зам. № 20/10-78. Ціна договірна

Видавництво «НТМТ»

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи № 1748 від 15.04.2004 р.
61072, м. Харків, вул. Дерв'янка, 16

Друкарня ТОВ «Цифра Прінт», м. Харків, вул. Данилевського, 30