

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МОЛНИЙ

6.1 ВВЕДЕНИЕ

Во вспышках молнии в облаке и по направлению от облака к земле происходит много отдельных физических процессов. Каждый из этих процессов связан с характерными электрическими и магнитными полями. Известно, что молния излучает значительную электромагнитную энергию в диапазоне радиочастот от менее 1 Гц до почти 300 МГц при пике в частотном спектре примерно от 5 до 10 КГц для молний на расстоянии более 50 км или около этого. Стоит отметить, что электромагнитное излучение, создаваемое молниями, может быть обнаружено даже на более высоких частотах, например, в микроволновом диапазоне (от 300 МГц до 300 ГГц) и, безусловно, в видимой части спектра излучения (приблизительно от 10^{14} до 10^{15} Гц). В диапазоне частот выше пика спектра спектральная амплитуда изменяется примерно обратно пропорционально частоте до 10 МГц или около этого и обратно пропорциональна квадратному корню от частоты, примерно от 10 МГц до 10 ГГц. Также известно, что молния порождает рентгеновские лучи (до 10^{20} Гц или более), хотя на уровне земли они обычно не регистрируются на расстоянии больше километра от источника. В целом, любой наблюдаемый электромагнитный сигнал от источника молнии может использоваться для обнаружения и определения местоположения процесса развития молнии, который вызвал его. В дополнение к электромагнитному излучению молния порождает акустическое излучение, которое также может использоваться для определения места развития молнии. Акустические методы определения местоположения, время поступления акустического сигнала и отслеживание акустического луча в настоящей главе далее не рассматриваются.

6.2 РАЗРЯД МОЛНИИ

Молния может определяться в качестве кратковременного сильноточного (обычно десятки килоампер) электрического воздушного разряда, длина которого измеряется в километрах. Как и для любого разряда в воздухе, канал молнии состоит из ионизированного газа, т. е. плазмы, максимальная температура которого обычно составляет 30 000 К, что примерно в пять раз выше температуры поверхности Солнца. Молния присутствовала на Земле задолго до развития человеческой жизни на Земле и, возможно, сыграла решающую роль в эволюции жизни на нашей планете. Глобальная частота вспышек молнии составляет от нескольких десятков до сотни в секунду или что-то около этого. Каждый год, примерно 25 миллионов разрядов молнии, направленных по направлению от облака к земле (необходимо отметить, что, в среднем, около 3/4 разрядов молнии ограничены облаками, иначе говоря, не связаны с землей), происходят только в США, убивая больше людей, чем торнадо и ураганы. Молния служит причиной многих лесных пожаров, и более 30 % всех аварий электросетей связано с молниями; молния попадает в каждое воздушное коммерческое судно в среднем один раз в год. Удар молнии в незащищенный объект или систему может иметь катастрофические последствия.

6.2.1 Типы молний, процессы и параметры

Примерно более 90 % глобальных молний по направлению от облака к земле объясняются отрицательно заряженной (отрицательный заряд эффективно переносится к земле) нисходящей (начальный процесс начинается в облаке и развивается вниз) молнией. Другие типы молнии в направлении от облака к земле включают положительные нисходящие, отрицательные восходящие и положительные восходящие разряды. Существуют также биполярные разряды молний, последовательно передающих как положительные, так и отрицательные заряды в течение одной и той же вспышки. Основными элементами отрицательного разряда нисходящей молнии являются так называемые компонентные удары или просто удары. Каждый разряд (или вспышка)

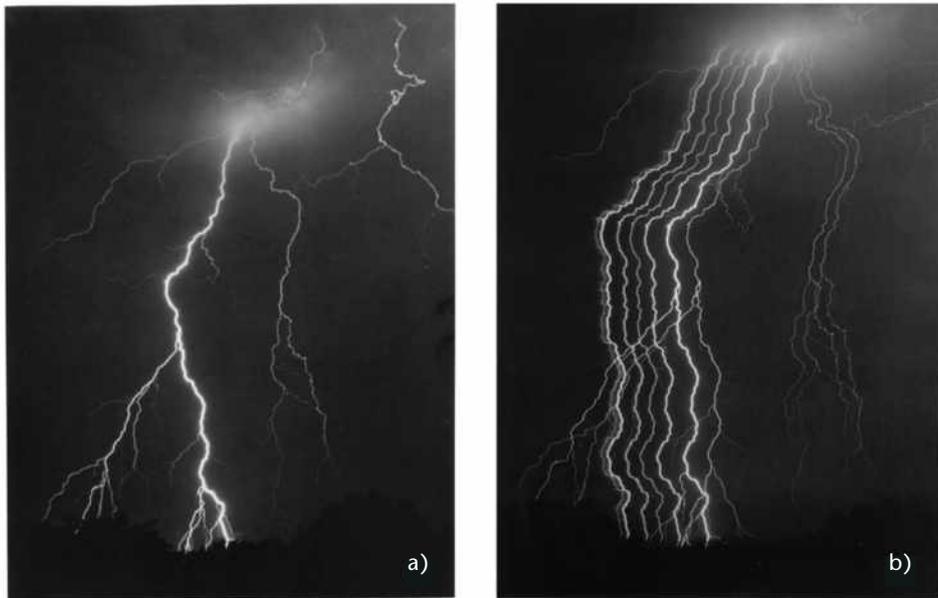


Рисунок 6.1. Вспышка молнии, которая имеет, по меньшей мере, 7 (возможно до 10) отдельных точек удара в землю. Изображение (а) является статичной фотографией, а изображение (b) — фотография камеры с временной разверткой. Некоторые из точек удара связаны с тем же ударом, имеющим отдельные ветвления, касающиеся поверхности земли, тогда как другие связаны с разными ударами, имеющими другой путь к земле. (Взято из работы Hendry, 1993).

обычно содержит от 3 до 5 ударов при наблюдавшемся диапазоне от 1 до 26. Примерно половина всех разрядов молнии к поверхности Земли попадает более чем в одну точку, при этом пространственное разделение между закрытиями канала составляет многие километры. Два основных процесса молнии, составляющих удар, называются лидером и возвратным ударом, которые происходят в виде последовательности с лидером, предшествующим возвратному удару. В дискуссии, представленной ниже, разряды молний рассматриваются более подробно. В работе Rakov и Uman (2003) и содержащихся в ней ссылках представлено больше дополнительной информации.

На рисунках 6.1(а) и 6.1(б) показаны две фотографии отрицательного разряда по направлению от облака к земле. Снимок на рисунке 6.1(а) был получен с использованием стационарной камеры, тогда как снимок на рисунке 6.1(б) был сделан отдельной камерой, которая двигалась горизонтально во время вспышки. В результате, второй снимок имеет временную развертку, показывая семь четких светящихся каналов между облаком и землей. Темные интервалы между этими каналами обычно составляют порядка десяти миллисекунд и объясняют причину, почему молнии часто представляются глазу человека «мерцающими». Каждый светящийся канал соответствует отдельному удару, при этом первый удар является крайним справа (временные опережения справа налево). Первые два удара имеют ветвистый вид, и направление ветвлений вниз означает, что это вспышка нисходящей молнии.

Схематические рисунки фотографических изображений и снимков с временной разверткой изображения вспышки молнии с тремя ударами представлены соответственно на рисунках 6.2(а) и 6.2(б). На рисунке 6.2(с) показано схематическое изображение соответствующего тока в основании канала. На рисунке 6.2(б) временные опережения слева направо и временной масштаб не являются непрерывными. Каждый из трех ударов на рисунке 6.2(б), представленный свечением, как функции высоты над землей и времени, состоит из процесса движения вниз, называемого лидером, и процесса движения вверх, называемого возвратным ударом. Лидер создает токопроводящую дорожку между областью источника заряда в облаке и землей, и распределяет отрицательный заряд из области источника в облаке вдоль этой дорожки, и возвратный

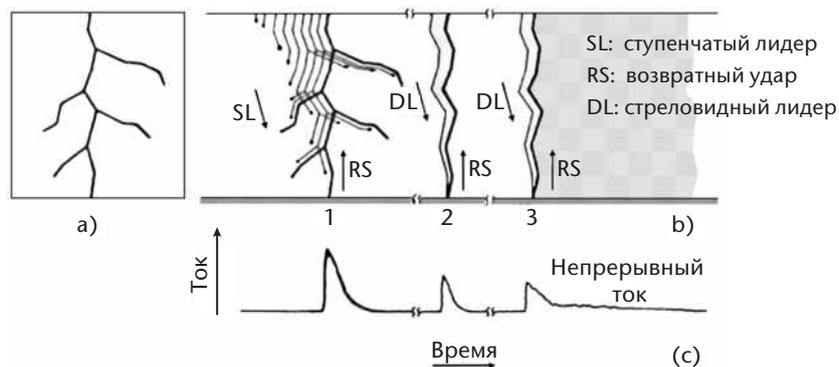


Рисунок 6.2. Схема, показывающая свечение вспышки из трех ударов у поверхности земли и соответствующую силу тока у основания канала. Изображение (а) — это снимок статичной камеры; (b) — это снимок камеры с временной разверткой и (с) — это ток у основания канала.

удар проходит этот путь, двигаясь от поверхности земли к области источника заряда в облаке, и нейтрализует отрицательный заряд лидера. Таким образом, процессы лидера и возвратного удара служат в качестве эффективного переноса отрицательного заряда от облака к земле. Как можно видеть на рисунке 6.2(b), лидер, инициирующий первый возвратный удар, отличается от лидеров, инициирующих два последующих удара (все удары, кроме первого, называются последующими ударами). В частности, первый удар-лидер представляется оптически прерывистым процессом, и называется, поэтому ступенчатым лидером, тогда как конец лидера последующего удара представляется непрерывно движущимся. Постоянно движущийся конец лидера последующего удара представляется на фотографиях с временной разверткой как движущаяся вниз «стрела», и поэтому используется термин стреловидный лидер. Очевидное различие между двумя типами лидеров связано с тем, что ступенчатый лидер развивается в невозмущенном воздухе, тогда как стреловидный лидер следует по «заранее обусловленному» пути предшествующего удара или ударов. Иногда последующий лидер демонстрирует ступенчатое смещение при распространении в ранее образованном канале; в этом случае он называется стреловидно-ступенчатый лидер. Существуют также так называемые хаотичные лидеры последующего удара. Все типы лидеров вызывают выбросы рентгеновского излучения, энергия которого обычно составляет до 250 кэВ (в два раза больше энергии рентгенографии грудной клетки) (Dwyer, 2005).

Разность электрического потенциала между концом движущегося вниз ступенчатого лидера и землей составляет, вероятно, несколько десятков мегавольт, что сравнимо или составляет значительную часть между источником заряда в облаке и землей. Величина разности потенциала между двумя точками, одна из которых находится у источника заряда в облаке, а другая на земле, является линейным интегралом интенсивности электрического поля между этими точками. Верхний и нижний пределы разности потенциала между нижней границей области основного отрицательного заряда и землей можно оценить, умножив соответственно обычное наблюдаемое электрическое поле в облаке, 10^5 В/м, и ожидаемое электрическое поле у земли под грозовым облаком непосредственно до зарождения молнии, 10^4 В/м, на высоту нижней границы центра отрицательного заряда над землей, примерно 5 км. Полученный диапазон составляет от 50 до 500 МВ.

Когда нисходящий ступенчатый лидер достигает поверхности земли, начинается первый возвратный удар. Ток первого возвратного удара, измеренный у земли, повышается до начальной пиковой величины примерно 30 кА в течение нескольких микросекунд, и падает до половины пикового значения в течение нескольких десятков микросекунд. Возвратный удар эффективным образом опускает к поверхности земли несколько кулонов заряда, первоначально отложенного в канале ступенчатого лидера, включая все ветвления, а также любой дополнительный заряд в облаке, который может войти в канал возвратного удара.

Как только нижняя часть канала стреловидного лидера достигает земной поверхности, вверх запускается волна второго (или любого последующего) возвратного удара, который снова используется для нейтрализации заряда лидера. Сила тока последующего возвратного удара у земли обычно повышается до максимального значения от 10 до 15 кА за менее, чем микросекунду, и падает до половины максимального значения в течение нескольких десятков микросекунд.

Волна высокотоккового возвратного удара разогревает канал до максимальной температуры примерно 30 000 К и выше и создает давление в канале около или более 1 МПа, приводя к расширению канала, интенсивной оптической радиации и распространяющейся наружу ударной волне, которая в конечном счете становится громом (звуковая волна), который мы слышим на расстоянии.

За импульсным компонентом тока в возвратном ударе (обычно последовательном) часто следует постоянный ток, который имеет величину от десятков до сотен ампер и продолжительность до сотен миллисекунд. Непрерывные токи с продолжительностью, превышающей 40 мс, обычно называются длительными непрерывными токами. От 30 % до 50 % всех отрицательных вспышек от облака к земле содержат длительный непрерывный ток. Импульсы тока, наложенные на непрерывные токи, а также соответствующее повышение свечения канала молнии называются М-компонентами.

Существует особый тип молнии, который считается наиболее интенсивным естественным генератором ВЧ/ОВЧ (3—300 МГц) излучения на Земле. Он называется компактным внутриоблачным разрядом (CID). О компактных внутриоблачных разрядах впервые было сообщено Le Vine (1980), получивших свое название (Smith et al., 1999) вследствие относительно небольшой (сотни метров) пространственной протяженности. Они происходят на больших высотах (в основном выше 10 км), по-видимому, связаны с сильной конвекцией (однако даже самая мощная конвекция не всегда порождает CID), производят меньше света, чем другие типы разрядов молний и вызывают единичные импульсы биполярных электрических полей (короткие биполярные импульсы или NBP), имея типичную полную ширину от 10 до 30 мкс и амплитуды порядка 10 В/м на 100 км, что сравнимо или выше, чем для возвратных ударов во вспышках от облака к земле. В качестве иллюстрации отличительной черты широкополосных электромагнитных CID, 48 CID, детально исследованные Nag et al. (2010), были зарегистрированы 4-мя из 22-х (в среднем 11) станций Национальной сети обнаружения молний США (NLDN), средняя базисная линия которой составляет 300—350 км.

6.2.2 Электромагнитные характерные признаки молнии

Разряды молнии по направлению от облака в землю и внутри облака состоят из ряда процессов, которые образуют характерные признаки электромагнитного поля. Ниже вкратце рассматриваются ярко выраженные характеристики измеренных электрических и магнитных полей, образованных различными процессами молний от десятков до сотен километров. Особое внимание уделяется тем процессам, которые вызывают значительные изменения поля в масштабе микросекунды и долей микросекунды.

В таблице ниже обобщаются, главным образом, все определяемые отличительные черты поля излучения молнии, регистрируемые на земле. Следует отметить, что очевидно не существует характерного признака поля в масштабе микросекунды, связанного с процессами К- и М-молнии. Кроме того, возвратные удары (первый ряд) и компактные внутриоблачные разряды (последний ряд), импульсы, вызываемые процессами развития молнии, представленные в таблице, происходят сериями с интервалами между импульсами порядка долей миллисекунды. Импульсы лидера (второй и третий ряды), предположительно испускаемые нижней частью канала на землю перед самым началом возвратного удара, будучи оба начальными импульсами пробоя (четвертый и пятый ряды) и регулярными пакетами импульсов (шестой ряд), вызываются процессами молнии, происходящими внутри облака. Характеристика, приведенная ниже, относится и к общим последовательностям импульсов и к отдельным импульсам.

Характеристики импульсов электрического поля в масштабе микросекунды, связанные с различными процессами молнии (по материалам работы Rakov, 1999)

<i>Тип импульсов</i>	<i>Преобладающая полярность (правило знаков атмосферного электричества)</i>	<i>Типичная общая продолжительность импульса (мкс)</i>	<i>Типичный временной интервал между импульсами (мкс)</i>	<i>Комментарии</i>
Возвратный удар в отрицательных наземных вспышках	Положительная	30—90 (время пересечения нулевого уровня)	60×10^3	3—5 импульсов на вспышку
Ступенчатый лидер в отрицательных наземных вспышках	Положительная	1—2	15—25	В пределах 200 мкс непосредственно перед возвратным ударом
Стреловидный лидер в отрицательных наземных вспышках	Положительная	1—2	6—8	В пределах 200 мкс непосредственно перед возвратным ударом
Начальный пробой в отрицательных наземных вспышках	Положительная	20—40	70—130	От нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд перед первым возвратным ударом
Начальный пробой во вспышках в облаке	Отрицательная	50—80	600—800	Самые большие импульсы во вспышке
Регулярный пакет импульсов во вспышках, как в облаке, так и в отрицательных наземных вспышках	Обе полярности примерно равной вероятности	1—2	5—7	Происходят позднее во вспышке; 20—40 импульсов на пакет
Компактный внутриоблачный разряд (короткое биполярное явление)	Имеют место обе полярности, при этом отрицательная имеет место более часто	10—30	—	Обычно в пределах сотен миллисекунд какой-либо другой процесс молнии не предшествует разряду и не следует за ним

Примечания:

- a Полярность начальной половины цикла в случае биполярных импульсов.
- b В соответствии с обозначением знака атмосферного электричества, предполагается, что направленный вниз вектор электрического поля положительный.

Отрицательные наземные вспышки

Обычная структура импульса в масштабе микросекунды естественно происходящих отрицательных наземных разрядов, наблюдающихся у земли, включает начальную серию импульсов (обычно называемых начальными или предварительными импульсами пробоя), за которыми обычно следуют через несколько миллисекунд или нескольких десятков миллисекунд 3—5 относительно больших импульсов возвратного удара с интервалом несколько десятков миллисекунд. Продолжительность начальной последовательности импульсов обычно несколько миллисекунд. На рисунке 6.3(а) показаны формы волны отдельного импульса, характерные для предварительного пробоя в отрицательных вспышках у земли. Начальная полярность предварительных импульсов пробоя обычно такая же, как и импульса последующего возвратного удара. Первоначальные импульсы пробоя могут иметь амплитуды, сравнимые или даже превышающие амплитуды соответствующих импульсов возвратного удара. Непосредственно перед импульсом первого возвратного удара и до импульсов некоторых последующих возвратных ударов наблюдаются последовательности импульсов, связанные в первом случае с процессом ступенчатого лидера и в последнем случае со стреловидно-ступенчатым (ряд регулярных импульсов) или хаотичным (ряд нерегулярных импульсов) процессом лидера. Эти

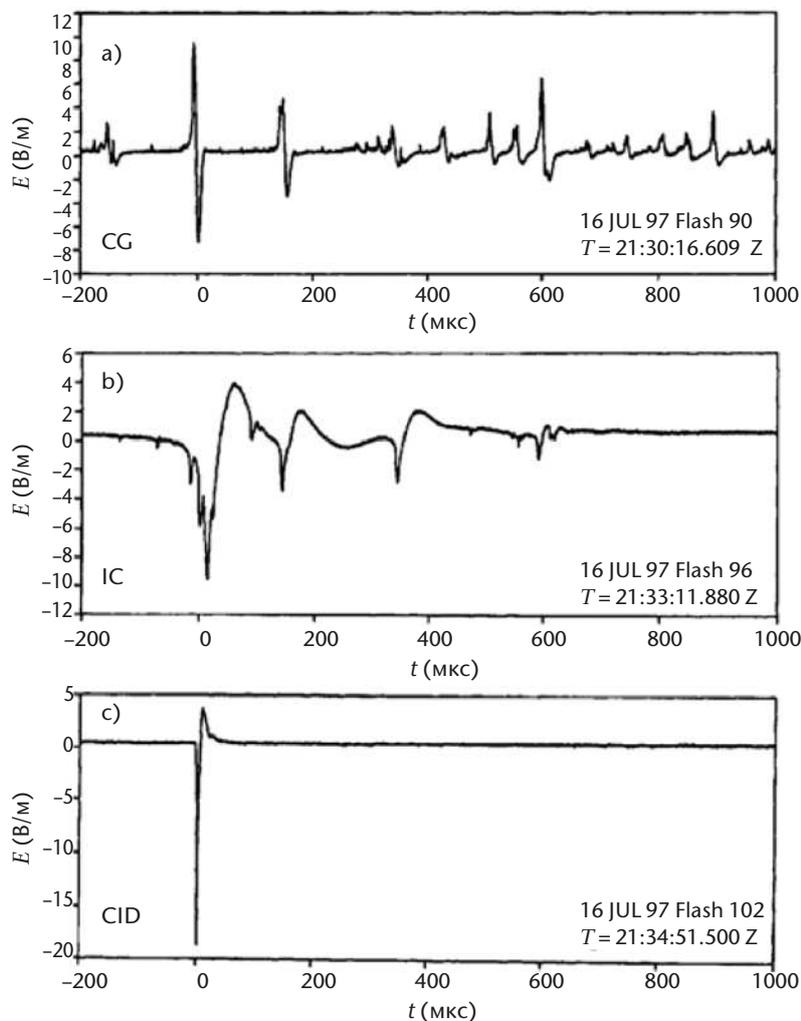


Рисунок 6.3. Примеры волновых форм импульсов электрического поля (E), характерных для а) начального пробоя в отрицательных наземных вспышках по направлению от облака к земле (CG), б) начального пробоя во вспышках внутри облака (IC) и в) компактных внутриоблачных разрядов (CIDs). Положительно заряженное электрическое поле (правило знаков атмосферного электричества) отклоняется вверх. (Займствовано из работы Rakov, 1999).

последовательности импульсов наблюдались в течение нескольких десятков сотен микросекунд, и амплитуды импульсов от одного до двух порядков величины меньше, чем соответствующая амплитуда импульса возвратного удара. Импульсы ступенчатого лидера видны непосредственно до импульса возвратного удара на рисунке 6.4(a), до $t = 0$. Довольно нерегулярный ряд импульсов, указывающий на хаотичного лидера, виден до импульса последующего возвратного удара (до $t = 0$) на рисунке 6.4(b). Обычно имеется относительно спокойный промежуток в масштабе миллисекунды между предварительной последовательностью импульсов пробоя и началом выраженных импульсов ступенчатого лидера. Интервалы между импульсами возвратного удара и временной интервал несколько десятков миллисекунд или около того, следующий за импульсом последнего возвратного удара, содержат регулярные пачки импульсов относительно небольшой амплитуды и некоторую другую обычно нерегулярную активность импульсов. Пики импульсов в регулярных вспышках импульсов примерно на два порядка величины меньше, чем пики начального поля возвратного удара в той же вспышке. Как можно видеть в таблице, регулярные вспышки импульсов очень похожи по своим характеристикам на серии импульсов, связанных со стреловидно-ступенчатыми лидерами. Среднее геометрическое начального пика электрического поля, нормализованного к 100 км для отрицательных первых ударов, примерно 6 В/м, что почти в 2 раза больше, чем для отрицательных последующих ударов, примерно 3 В/м. Геометрическое среднее для интервала времени между возвратными ударами составляет 60 мс.

Положительные наземные вспышки

Положительные вспышки обычно содержат единственный возвратный удар (хотя наблюдалось до четырех ударов на вспышку), чьи волновые формы электрического и магнитного поля в масштабе микросекунды подобны характеристикам отрицательных первых возвратных ударов, за исключением начальной полярности. Пример волновой формы электрического поля положительного возвратного удара приводится на рисунке 6.4(c). Небольшие импульсы, видимые до $t = 0$ на рисунке 6.4(c) указывают на процесс ступенчатого лидера. В отличие от отрицательных первых ударов, эти импульсы обнаруживаются примерно только в одной трети волновых форм поля. Средний начальный пик электрического поля, нормализованный к 100 км для положительных первых ударов, примерно в два раза больше, чем для отрицательных первых ударов. Положительные удары в землю могут инициироваться подобным же образом, как инициируются отрицательные вспышки молнии (см. выше), или они могут быть побочными продуктами протяженных облачных разрядов.

Облачные вспышки

Структура обычного импульса, который наблюдается в происходящих естественным образом разрядах в облаках, включает начальную последовательность (или последовательности) импульсов относительно большой амплитуды, разделенных промежуток в несколько сотен микросекунд и происходящих в течение первых нескольких, до десятков миллисекунд, за которыми следует ряд вспышек регулярных импульсов значительно меньшей амплитуды. Импульсы во вспышке имеют интервал нескольких микросекунд, при этом каждая вспышка длится в течение нескольких сотен микросекунд. Волновые формы отдельных импульсов, характерные для начального пробоя во вспышках в облаке, представлены на рисунке 6.3(b). Начальная полярность этих импульсов имеет тенденцию к противоположной полярности первоначальных импульсов пробоя в отрицательных вспышках, идущих к земле. Имеются также импульсы микросекундного масштаба с амплитудами значительно ниже по сравнению с амплитудами начальных импульсов пробоя, которые рассредоточены, в отличие от кластеризации в пакетах, по всей вспышке. Некоторые из этих небольших и часто нерегулярных импульсов связаны со ступенчатыми изменениями K (характерные признаки поля K -процессов). Изменения K обычно происходят на последней стадии облачной вспышки и отделены многими десятками миллисекунд.

Компактные внутриоблачные разряды

На рисунке 6.3(с) приведен пример характерного признака электрического поля компактных внутриоблачных разрядов (также называемых короткими биполярными событиями). Эти импульсы имеют пики и пиковые временные производные, сравнимые с пиками возвратных ударов в наземных вспышках.

6.2.3 Глоссарий терминов

Правило знаков атмосферного электричества: правило знаков электрического поля, в соответствии с которым направленный вниз вектор поля определяется как положительный.

Биполярная молния: разряды молнии, последовательно передающие как положительные, так и отрицательные заряды к земле во время одной и той же вспышки.

Облачная вспышка: вспышка, которая не соприкасается с землей.

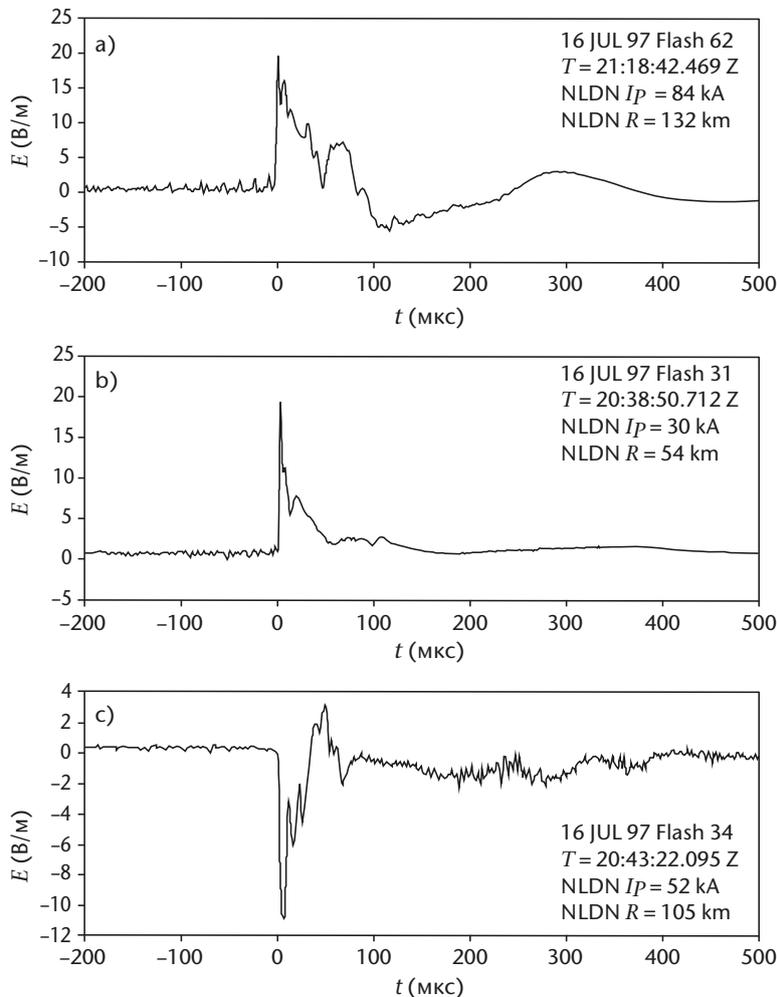


Рисунок 6.4. Примеры волновых форм импульсов электрического поля для а) отрицательного первого удара, б) отрицательного последующего удара и с) положительного первого удара. Все три явления были обнаружены Национальной сетью обнаружения молний США (NLDN); и их сообщенные характеристики (оцениваемый максимальный ток I_p и расстояние R) представлены на графиках. См. также надпись к рисунку 6.3. (Заимствовано из работы Rakov, 1999).

Вспышка от облака к земле (CG), наземная вспышка: вспышка, которая содержит, по меньшей мере, один возвратный удар.

Облачная молния: разряды молнии, которые не вовлекают поверхность земли.

Компактный внутриоблачный разряд (CID): разряд молнии небольшого пространственного масштаба (обычно сотни метров) в облаке, который считается наиболее интенсивным природным генератором излучения ВЧ/ОВЧ (3–300 МГц) на Земле.

Непрерывный ток: устойчивый ток, немедленно следующий за некоторыми импульсами тока возвратного удара.

Разряд: часто используется, как синоним вспышки.

Молния, идущая вниз от облака к земле: разряды молнии в землю, инициированные нисходящими лидерами из облака.

Событие: конкретная часть вспышки, обычно любой изолированный сигнал, измеренный во время вспышки.

Вспышка, вспышка молнии: процесс полной нейтрализации, который включает много событий (лидеры, удары, процессы К, непрерывные токи и т. д.) в пределах временного интервала около 1 с; относится к облачной вспышке или наземной вспышке.

Плотность наземной вспышки: количество наземных вспышек на единицу площади за единицу времени (обычно на квадратный километр в год).

Процессы К: переходные процессы, происходящие в ранее созданном канале молнии, который не связан (или утратил свою связь) с землей. Они могут происходить, как в наземных вспышках, так и во внутриоблачных.

Лидер: процесс развития молнии, который создает токопроводящий путь между областью источника заряда облака и землей (в случае нисходящей молнии по направлению от облака к земле) и распределяет заряд из области источника в облаке вдоль этого пути.

Молния или вспышка молнии: она может определяться как кратковременный высокоточный (обычно десятки килоампер) электрический разряд в атмосфере, длина которого чаще всего измеряется в километрах.

Компоненты-М: переходные процессы, происходящие в заземленном канале молнии при прохождении непрерывного тока.

Отрицательная молния: разряды молнии, которые эффективно понижают отрицательный заряд по направлению от облака к земле.

Положительная молния: разряды молнии, которые эффективно понижают положительный заряд по направлению от облака к земле.

Возвратный удар, удар по направлению от облака к земле, удар: процесс развития молнии, который проходит по ранее созданному каналу лидера по направлению от земли к области источника заряда облака и нейтрализует заряд лидера.

Спровоцированные ракетами (триггерные) молнии: разряды молнии, искусственно вызванные из природных грозовых облаков, используя метод запуска ракеты с тросом.

Сферик или атмосферик: электромагнитный сигнал от разряда молнии, который перемещается на большие расстояния.

Удар: см. возвратный удар.

Грозовой очаг: конвективная ячейка, обычно несколько километров в диаметре, характеризующаяся относительно мощными восходящими потоками (>10 м/с). Срок жизни обычного очага составляет порядка 1 ч.

Восходящая молния от облака к земле: разряды молнии в землю, инициированные восходящими лидерами от заземленных объектов.

6.3 ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОЛНИИ

6.3.1 Общие сведения

Для трех наиболее общих электромагнитных радиочастотных методов определения местоположения с многих станций — магнитная система радиопеленгации (MDF), время поступления сигнала (TOA) и интерферометрия — вид полученной информации о местоположении зависит от частоты f (или от длины волны $\lambda = c/f$, где c — скорость света) обнаруженного излучения (Rakov и Uman, 2003). Для обнаруженных сигналов, длины волн которых очень короткие по сравнению с длиной излучающего канала молнии, например, диапазона очень высокой частоты (ОВЧ), где $f = 30—300$ МГц и $\lambda = 10—1$ м, весь канал молнии может быть в принципе изображен в двух- или трехмерном измерении. Для длин волн, которые превышают или составляют значительную часть длины канала молнии, например, диапазон очень низкой частоты (ОНЧ), где $f = 3—30$ кГц и $\lambda = 100—10$ км и диапазон низкой частоты (НЧ), где $f = 30—300$ кГц и $\lambda = 10—1$ км, в целом можно с пользой определить только одно или несколько местоположений для каждого канала молнии. В случае определения единичного местоположения возвратного удара от облака к земле, оно обычно интерпретируется с некоторой аппроксимацией до точки удара в землю. Наилучшие электромагнитные методы отображения канала при ОВЧ и наилучшие методы локализации точки удара в землю при ОНЧ и НЧ имеют точность (фактически ошибки или неопределенности локализации) порядка сотен метров. С другой стороны шкалы точности системы ОНЧ большого радиуса действия, которые работают в узком диапазоне частот, обычно где-то между 5 и 10 кГц и определяют местоположение молнии на расстояниях до тысяч километров, имеют неопределенности в локализации отдельных вспышек молнии порядка 10 км и более. Эти последние системы часто называют грозowymi локаторами.

Для тех электромагнитных методов определения местоположения, включающих измерение амплитуд изменения поля на многих станциях, ширина полосы измерений не связана напрямую с точностью локализации. Достаточно иметь систему измерений, которая может точно воспроизвести изменения поля процесса, представляющего интерес. Таким образом, например, с помощью измерения изменения электростатического поля в диапазоне частот от доли герца до нескольких герц на многих станциях, можно определить «среднее» местоположение источника заряда полной вспышки от облака к земле; а с помощью узкополосной системы разрешить изменения электростатического поля в миллисекундном масштабе времени, и тем самым определить местоположение источников заряда для отдельных импульсов во вспышке, а также для непрерывного тока. Локализация молнии, используя пики электрического или магнитного поля возвратного удара, подобно локализации с помощью изменения электростатического поля, требует только, чтобы система точно воспроизводила эти пики. Методы локализации молнии с амплитудой электромагнитного поля в настоящей главе не рассматриваются.

В точных системах определения местоположения молний, отображают ли они весь молниевый канал или определяют только точки удара в поверхность земли или центры заряда в облачности, обязательно используются многочисленные датчики. Датчики одной наземной станции, такие как счетчики вспышек молнии, фиксируют явление молнии, но не могут быть использованы для его локализации на основе отдельной вспышки. В их

конструкциях это не предусмотрено из-за широкого диапазона амплитуд и форм волн, связанных с отдельными явлениями. Тем не менее, с помощью датчиков одной станции можно распределить группы вспышек по примерным радиусам дальности, в случае если были собраны и осреднены данные за некоторый период времени. Существует много относительно простых и коммерчески доступных устройств единичной станции, которые предназначены для определения местоположения молнии. Большинство функционируют как радиоприемники АМ-сигналов с амплитудной модуляцией на постоянной частоте, которая используется для замера расстояния до отдельных вспышек молнии методом, который по своей природе характеризуется большими ошибками. Кроме полевых амплитудных детекторов, некоторые коммерческие устройства единичной станции используют оптические детекторы, магнитные радиопеленгаторы и/или характеристики волновых форм молнии для оценки расстояния возвратных ударов от облака к земле до датчика.

Оптические датчики единичной станции на орбитальных спутниках Земли обнаруживают свет молнии, рассеянный скоплением облачности, порождающей молнию, и поэтому не могут выполнить локализацию лучше, чем около 10 км, что составляет примерно диаметр небольшого облака. Кроме того, спутниковые датчики не могут различать облачные и наземные разряды. Запланировано, что серия следующего поколения геостационарных оперативных спутников для исследования окружающей среды (ГОЕС-Р) будет иметь на борту геостационарный картограф молний (ГКМ), для проведения постоянного мониторинга молний с широкой зоной обзора. Запуск первого спутника серии ГОЕС-Р запланирован на 2015 г.

В нижеследующих подразделах обсуждается, как отдельные датчики, измеряющие разные свойства электромагнитного излучения молнии, были объединены в системы для обеспечения практического определения местоположения молнии. Более подробная информация представлена в обзорах Rakov и Uman (2003) и Cummis и Murphy (2009) и в справочной литературе.

6.3.2 Пеленгация магнитного поля

Для получения направления к источнику могут быть использованы две вертикальные и прямоугольные рамки с плоскостями, ориентированными в направлении север-юг и восток-запад, каждая измеряющая магнитное поле с данного вертикального излучателя. Это так, потому что выходное напряжение данной рамки по закону Фарадея пропорционально косинусу угла между вектором магнитного поля и нормальным вектором к плоскости рамки. Для вертикального излучателя линии магнитного поля являются коаксиальными кругами в отношении источника. Таким образом, например, рамка, плоскость которой ориентирована в направлении север-юг получает максимальный сигнал, если источник расположен к северу или югу от антенны, тогда как прямоугольная рамка восток-запад не получает сигнала. В общем, соотношение двух сигналов от рамок пропорционально тангенсу угла между севером и источником, если смотреть со стороны антенны.

Пеленгаторы магнитного поля с пересекающимися рамками (DFs), используемые для обнаружения молнии можно разделить на два общих типа: узкополосные (настроенные) пеленгаторы и стробируемые широкополосные пеленгаторы. В обоих случаях метод пеленгации включает неявное предположение, что излучаемое электрическое поле имеет вертикальную ориентацию и связанное с ним магнитное поле ориентировано горизонтально и перпендикулярно к пути распространения.

Узкополосные пеленгаторы использовались для обнаружения отдаленных молний с 1920-х гг. Они обычно работают в узкой полосе частот с центральной частотой в диапазоне от 5 до 10 кГц, где ослабление в волноотводе земля-ионосфера относительно низкое, а энергия сигнала молнии относительно высокая. До разработки метеорологических радиолокаторов в 1940-х гг. системы локализации молний были основным средством идентификации и картирования гроз в среднем и длинном диапазонах.

Основной недостаток узкополосных пеленгаторов состоит в том, что для молний в диапазонах менее, чем примерно 200 км, эти пеленгаторы имеют присущие им азимутальные ошибки, называемые ошибками поляризации порядка 10° . Эти ошибки вызываются обнаружением компонентов магнитного поля не из вертикальных участков канала, линии магнитного поля которых образуют круги в плоскости, перпендикулярной не вертикальному участку канала, и также ионосферными отражениями, пространственными волнами, магнитные поля которых подобным образом неправильно ориентированы для пеленгации точки попадания на поверхности земли.

Для решения проблемы больших ошибок определения поляризации в узких диапазонах, присущих работе узкополосных пеленгаторов, в начале 1970-х гг. были разработаны стробируемые широкополосные пеленгаторы. Пеленгация осуществляется отбором (стробированием) компонентов север-юг и восток-запад начального пика магнитного поля возвратного удара, причем этот пик излучается от дна молниевоего канала на расстоянии около ста метров в первые микросекунды возвратного удара. Поскольку дно канала разряда стремится к прямому и вертикальному направлению, а магнитное поле в основном горизонтальное. Кроме того, стробируемый пеленгатор не регистрирует ионосферные отражения, так как эти отражения прибывают намного позже после отбора начального пика магнитного поля. Рабочая ширина полосы стробируемого широкополосного пеленгатора обычно составляет от нескольких килогерц до примерно 500 кГц. Интересно, что, хотя необходима высокочастотная характеристика, составляющая многие мегагерцы для обеспечения точного воспроизведения пика поля приходящего излучения, особенно, если распространение осуществляется над соленой водой, применяемым на практике пеленгаторам достаточна только высокочастотная характеристика в несколько сотен килогерц для получения азимутальной ошибки, примерно 1° . Это обусловлено тем, что отношение пиковых сигналов в двух рамках не чувствительно к одинаковому искажению, вызываемому идентичным соответствием электронных цепей двух рамок. Подобным же образом, при правильной калибровке и поправке на эффекты распространения, используемым на практике пеленгаторам необходима только высокочастотная характеристика в несколько сотен килогерц для получения ошибки оценки максимального тока в 15—20 %. Таким образом, стробируемый широкополосный пеленгатор может работать на частотах ниже полосы АМ-сигналов и ниже частот некоторых самолетных навигационных передатчиков, что может, в противном случае, вызвать нежелательные направленные помехи.

Стробируемые широкополосные пеленгаторы, а также и узкополосные пеленгаторы подвержены ошибкам, связанным с рельефом местности. Ошибки, связанные с рельефом местности, являются систематической функцией направления, но в целом, они не зависят от времени. Эти ошибки вызываются присутствием нежелательных магнитных полей вследствие неровности пересеченной местности, присутствия рядом с ними электропроводящих объектов, таких как подземные и воздушные силовые линии и конструкции, которые начинают излучать ток при возбуждении полями приходящих молний. Для полного исключения ошибок, связанных с рельефом местности, район, окружающий пеленгатор, должен быть плоским и однородным без существенных электропроводящих объектов, включая заглубленные объекты, находящиеся рядом. Эти требования обычно трудновыполнимы, поэтому гораздо легче измерить ошибки пеленгатора, связанные с рельефом, и компенсировать их, чем искать место, характеризующееся приемлемыми небольшими ошибками, связанными с рельефом. По сообщениям (используя независимые оптические данные), после внесения поправок, остаточные ошибки обычно составляют менее 2° — 3° .

Так как изначально неизвестно, уменьшит ли удар в землю положительный или отрицательный заряд, имеется погрешность в 180° азимута удара из измерения только ортогональных магнитных полей. Эта погрешность разрешается во всех системах широкополосных пеленгаторов посредством измерения соответственного электрического поля, поляриность которого указывает на знак заряда, переданного в землю.

6.3.3 Метод регистрации времени поступления сигнала

Единый датчик регистрации времени поступления сигналов дает срок наблюдения, в который некоторая часть сигнала электромагнитного поля поступает на антенну определения направления. Системы регистрации времени поступления сигнала, используемые для определения координат молнии можно разделить на три общих типа: (i) очень короткая базисная линия (от десятков до сотен метров), (ii) короткая базисная линия (десятики километров), и (iii) длинная базисная линия (от сотен до тысяч километров). Системы с короткой и очень короткой базисной линией обычно работают в диапазоне ОВЧ, т. е. на частотах от 30 до примерно 300 МГц, тогда как системы с длинной базисной линией обычно работают на частотах ОНЧ и НЧ от 3 до 300 кГц. В целом считается, что излучение ОВЧ связано с процессами пробоя в воздухе, тогда как сигналы ОНЧ вызываются электрическим током в проведенных молниевых каналах. Системы с короткой базисной линией обычно предназначаются для представления изображений молниевых каналов и для исследования пространственного и временного развития разрядов. Системы с длинной базисной линией обычно используются для определения мест удара в землю и явлений молнии в облачности преимущественно в вертикальных каналах, или среднего местоположения вспышки.

Система с очень короткой базисной линией (от десятков до сотен метров) состоит из двух или более ОВЧ приемных устройств регистрации времени поступления сигнала (ВП), расстояние между которыми таково, что временная разница между временем поступления отдельного ОВЧ-импульса от молнии на этих приемниках небольшая по сравнению с временем между импульсами, длительность которых составляет от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Местоположение всех точек источника, способного вызвать данную временную разницу между двумя приемниками, в целом является гиперboloидом, но если промежуток между приемниками очень небольшой, то гиперboloид вырождается в этом пределе в плоскость, на которой обнаруживается источник. Две временные разницы от трех очень близко расположенных приемных устройств дают две плоскости, пересечение которых дает направление к источнику, т. е. его азимут и высоту. Для обнаружения местоположения источника по сравнению с определением направления к источнику, необходимо использовать два или более наборов близко расположенных приемных устройств, при этом наборы разделяются десятками километров и более. Каждый набор приемных устройств является по существу пеленгатором ВП, а пересечение двух и более векторов дает местоположение.

Системы ВП с короткой базисной линией обычно представляют сети от 5 до 15 станций, которые используют информацию о времени поступления сигнала для трехмерного (3D) картирования каналов молнии. Портативный вариант такой системы был разработан исследователями Института горного дела и технологии штата Нью-Мексико. Эта система в настоящее время называется системой картирования по грозопоражаемости (LMA) и стала недавно основным инструментом, как для исследований молний, так и для оперативного применения. Системы ВП ОВЧ с короткой базисной линией предоставляют электромагнитные снимки развивающихся каналов любого типа вспышки молнии.

Первые системы ВП с длинной базисной линией (от сотен до тысяч километров) работали на частотах ОНЧ/НЧ. Например, одна из них использовала пару приемных станций в Массачусетсе с шириной полосы 4—45 кГц, разделенных расстоянием более 100 км (вся сеть состояла из четырех станций), для сравнения разности времени получения сигналов на каждой станции, и таким образом, для определения направлений случившегося в западной Европе разряда молнии. Система из двух станций была, по сути, пеленгатором, подобным системам с очень короткой базисной линией, описанным выше, но работающим на более коротких частотах и с более длинной базисной линией. Полученные в результате направления имели хорошее соответствие с координатами, полученными сетью станций узкополосных пеленгаторов Метеобюро СК, которая была оперативной в это время. Для объяснения распространения по поверхности Земли использовалась сферическая геометрия при определении местоположения точек для постоянного измерения разности времени поступления сигнала между приемными устройствами.

Другая система ВП с длинной базисной линией, называемая разностно-дальномерной системой определения местоположения молнии (LPATS), была разработана в 1980-х гг. В системе LPATS, работающей на НЧ/ОНЧ частотах, использовались штыревые антенны электрического поля на станциях, разнесенных на 200—400 км для определения местоположения посредством измерения разности времени поступления сигнала на станциях. В используемой полосе частот волновые формы удара были, в общем, самыми большими и поэтому наиболее легко определяемыми. В принципе, для однозначного определения местоположения необходимы ответные реакции четырех станций (три разницы во времени), так как гиперболы на поверхности Земли только от двух разностей во времени могут, в общем, пересекаться в двух разных точках. Для молнии, направленной от облака к земле вблизи или в пределах сети, имеется часто только одно решение, так что в этом случае достаточным будет решение в форме трех станций.

6.3.4 Интерферометрия

В дополнение к излучающим изолированным импульсам, молния также вызывает шумоподобные всплески электромагнитного излучения, длительностью от десятков до сотен микросекунд. Местоположение этих всплесков трудно определить, используя методы ВП из-за трудности идентификации отдельных импульсов. В случае интерферометрии, идентификация отдельных импульсов не требуется, так как интерферометр измеряет фазовую разницу между узкополосными сигналами, соответствующими этим шумоподобным всплескам, получаемым двумя или более близкорасположенными датчиками. Самый простой интерферометр молнии состоит из двух антенн на расстоянии нескольких метров, при этом каждая антенна соединена через узкополосный фильтр с приемником. Антенны, фильтры и приемники идентичны. Выходные сигналы двух приемников посылаются в фазовый детектор, который создает напряжение, пропорциональное фазовой разнице между двумя квази-синусоидальными сигналами. Фазовая разница определяет, как и разность во времени в системах ВП с очень короткой базисной линией, плоскость, на которой расположен источник, т. е. однонаправленный угол к источнику ОВЧ. Для определения азимута и высоты источника необходимы, как минимум, три приемных антенны с двумя прямоугольными ортогональными базисными линиями. Для определения источника в трех измерениях требуются два или более синхронизированных интерферометра, эффективно действующих как пеленгатор и разделенных расстоянием порядка 10 км и более. Принципы интерферометрического определения местоположения молнии описаны подробно в работе Lojou et al. (2008).

Большинство интерферометрических систем работают в очень узких частотных полосах (от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц в полосах ОВЧ/УВЧ), поскольку это позволяет системе иметь высокую чувствительность в конкретной «спокойной» полосе работы. Однако это также делает эффективность системы подверженной локальной широкополосной интерференции и может не обеспечить самое высокое по возможности отношение сигнала-шума, а также накладывает конкретное ограничение на пространство между элементами расположения антенны во избежание погрешности во времени (фазе) поступления сигнала. В последнее время появилась тенденция использования широкополосной интерферометрии (Shao et al., 1966; Mardiana и Kawasaki, 2000; Morimoto et al., 2004). Эта тенденция сделала возможным приход допустимых широкополосных радиочастот и электронных средств обработки цифрового сигнала.

6.4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В целом, ожидается, что современная система ОНЧ-СЧ определения местоположения молнии регистрирует (в отдельных категориях) и определяет по конкретному району все удары от облака к земле любой полярности, а также облачные разряды. Также предполагается измерение интенсивности каждого разряда, обычно в форме максимального тока, полученного из измеренных электрических или магнитных полей. Соответственно можно оценить эффективность работы системы, используя следующие характеристики:

- a) эффективность обнаружения вспышек от облака к земле;
- b) эффективность обнаружения удара от облака к земле;
- c) эффективность обнаружения облачной вспышки;
- d) процент неправильно классифицированных событий (в особенности, облачные разряды, отнесенные к категории положительных или отрицательных ударов от облака к земле CG);
- e) точность определения местоположения (или ошибка локализации);
- f) ошибка оценки максимального тока.

В целом, эффективность обнаружения представляет дробную часть (обычно выражается в процентах) всех произошедших событий, обнаруженных системой, и идеально равна 100 %. Несмотря на то, что эффективность обнаружения удара от облака к земле (CG) можно легко определить (так как эти удары связаны с уникальной особенностью, которую можно наблюдать — светящийся канал до земли — и общее количество имевших место событий можно определить), концепция эффективности обнаружения облачной вспышки довольно неопределенна. Фактически, имеется много процессов облачных разрядов (некоторые из них плохо понятны), происходящих в различных пространственных и временных масштабах и явно непоказывающих каких-либо уникальных и легко наблюдаемых особенностей. В результате, общее количество произошедших событий в целом неизвестно. На практике, если принять все явления разрядов в облаке как «отсчеты», то количество обнаруженных разрядов в облаке может в основном определяться локальным уровнем помех и ограничением скорости передачи сигнала системы.

При определении распределения плотности наземных вспышек (CG) по данным локационных систем регистрации наземных разрядов молний для оценки их эффективности используется, вероятно, наиболее важный эксплуатационный показатель — вспышка, которая считается зарегистрированной, если, по меньшей мере, обнаружена хотя бы одна разрядная вспышка. Подобный подход может быть применен и для облачных вспышек, хотя необходимо определить, является ли единичный «отсчет» отдельной вспышкой, и как распределить множество отсчетов по отдельным вспышкам.

Погрешность определения местоположения оценивается расстоянием между реальным местоположением и сообщенным системой. В общем, погрешность определения местонахождения включает случайный и систематический компоненты. Второй компонент в некоторых случаях можно принимать во внимание (например ошибки, связанные с рельефом местности в системах МП).

Ошибка оценки максимального тока — разница между величиной фактического максимума тока и величиной, сообщенной системой, обычно выраженная в процентах от фактического максимума тока. Максимальные токи оцениваются системами обнаружения молнии, используя либо эмпирическое или основанное на модели уравнение преобразования поля в ток. Имеются обоснованные уравнения преобразования поля в ток для ударов от облака к земле (CG), но не для процессов облачных разрядов.

Для оценки рабочих характеристик, перечисленных выше, необходимы независимые данные (наземный контроль данных). Например, разряды, происходящие в точно известном месте, оборудованном устройством для измерения тока (высокая башня или средство, провоцирующее молнию) могут использоваться для оценки точности определения местонахождения и ошибки оценки максимального тока. Эффективность обнаружения и процент неправильно классифицированных явлений обычно оценивается на основе временного разрешения оптических данных. Иногда для оценки ошибок в определении местонахождения используется связанный с молнией ущерб, нанесенный различным объектам (здания, деревья и т. д.), хотя воздействие именно молнии при этом подходе не является однозначным вследствие недостаточной точности определения промежутка времени (обычно хуже, чем в пределах минуты). Менее определенные оценки рабочих характеристик системы обнаружения молнии возможны посредством моделирования или сравнения с более точной системой, работающей в том же районе. По состоянию на сегодняшний день выполнялось ограниченное количество исследований с привязкой, в особенности для первых ударов в отрицательных вспышках от облака к земле (CG), в положительных вспышках от облака к земле (CG) и в облачных разрядах.

В некоторых применениях (например, отслеживание грозových очагов) возможность отслеживания может быть более важной, чем обнаружение отдельных разрядов молнии. Функционирование систем для таких применений часто проверяется путем сравнения с радиолокационными или инфракрасными спутниковыми изображениями при хорошем соответствии обнаруженной молнии и районами с высокой радиолокационной отражательной способностью или низких температур верхней границы облачности, причем само сравнение рассматривается в качестве критерия обоснованности системы. Для раннего предупреждения способность обнаружения первой молнии является, вероятно, наиболее важной эксплуатационной характеристикой.

Неясно, как определять эксплуатационные характеристики для систем формирования ОВЧ-изображения канала молнии. Безусловно, они не могут обнаруживать все источники ОВЧ в облачности. Ограничения чувствительности не позволяют этим системам регулярно обнаруживать и картировать положительных лидеров. Таким образом, получающиеся в результате снимки ОВЧ неизбежно являются частичными. Далее обычно необходима вспомогательная информация о возвратных импульсах для проведения надежного различия между облачными и наземными вспышками, так как излучение ОВЧ непосредственно связанное с последующими возвратными ударами, ограничено, и его трудно обнаружить. Также оценки максимального тока невозможны. Тем не менее, системы формирования ОВЧ изображения канала молнии представляют очень ценный инструмент для изучения детальной морфологии и эволюции молнии, в особенности внутри облака, и часто используются в тестировании других типов систем локализации молний.

6.5 ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОЛНИЙ

В этом разделе в качестве репрезентативных примеров современных систем определения местоположений молний вкратце рассматривается система ОВЧ формирования изображения канала молнии (LMA); три системы ОНЧ/НЧ (NLDN, LINET и USPLN); система КВЧ/ОНЧ/СЧ/ВЧ (ENTLN) и три системы ОНЧ (WWLLN, GLD360 и ATDnet). Рассмотренные здесь системы были выбраны, так как они являются хорошими примерами каждого типа систем, но их включение не должно подразумевать, что они лучше других систем или что они рекомендуются для использования по сравнению с другими системами, не обсуждаемыми здесь. Информацию об этих и других системах можно найти в работах Rakov и Uman (2003), Cummis и Murphy (2009), Betz et al. (2009) и в представленной справочной литературе. Существует более 60 сетей определения местоположения молний по всему миру, работающих в диапазоне ОНЧ/НЧ.

Кроме общей характеристики каждой системы, в имеющейся информации об ее рабочих характеристиках особое внимание уделяется тем характеристикам, которые основаны

на официальных исследованиях контроля качества, опубликованных в рецензируемой литературе. В целом, количество такой информации о старых системах больше, чем о более современных системах.

6.5.1 Система картирования грозопоражаемости, 60—66 МГц

Сети системы картирования грозопоражаемости обычно состоят из 10—15 станций, расположенных с интервалом по 15–20 км и соединенных каналами беспроводной связи с центральным пунктом (Thomas et al., 2004). Каждая станция принимает сигналы от молнии (как от облачных вспышек, так и от наземных (CG)) в неиспользуемом местном телевизионном канале (обычно TV-канал 3, 60—66 МГц). Обычное временное разрешение (фиксированный временной промежуток) составляет 80—100 мкс. Большой временной промежуток, обычно 400 мкс, используется для обработки и отображения в реальном времени.

Точность определения местоположения сети LMA в Нью-Мексико исследовалась экспериментально с использованием шара-зонда с передатчиком ОВЧ, инверсионных следов воздушного судна и наблюдений за отдаленными бурями (Thomas et al., 2004). Также были разработаны простые геометрические модели для оценки неопределенности местоположения источников, как над сетью, так и вне сети. Было обнаружено, что результаты моделей являются хорошим способом оценки наблюдавшихся ошибок. Источники над сетью на высотах в диапазоне 6—12 км были обнаружены со среднеквадратической неопределенностью 6—12 м по горизонтали и 20—30 м по вертикали, что приводило к ошибке 3D менее чем 100 м для большинства обнаруженных источников. За пределами сети погрешности в определении местоположения возрастают с расстоянием.

6.5.2 Национальная сеть обнаружения молний США, 400 Гц — 400 кГц

Национальная сеть обнаружения молний состоит из более чем 100 станций, расположенных обычно с интервалом 300—350 км и охватывает смежные районы США (см. Cummins и Murphy, 2009). Применяется комбинация методов обнаружения времени поступления сигнала (ВП) и магнитного пеленгования (МП). Сообщается о разрядах молний в облаке и от облака к земле. Классификация выполнялась с помощью критериев волновой формы поля. Максимальные токи оцениваются из измеренных полей, используя эмпирические формулы на основе данных о молниях, спровоцированных ракетами. При этом выполняется корректировка пиков поля для объяснения эффектов распространения (более сильная, чем обратно пропорциональная зависимость от расстояния). Дальнейшая информация о развитии сети NLDN, соответствующей методике и применению данных NLDN изложена в работах Rakov и Uman (2003, глава 17), Orville (2008), Cummins и Murphy (2009) в соответствующих приведенных здесь справочных материалах.

Удары от облака к земле и эффективность определения местоположения вспышки исследовались с использованием видеокамер в Южной Аризоне, Оклахоме и Техасе (Biagi et al., 2007). Согласно оценкам, эффективность обнаружения ударов в Южной Аризоне составила 76 % ($N = 3\ 620$), а в Техасе/Оклахома она была 85 % ($N = 885$). Соответствующая эффективность обнаружения вспышки составила 93 % ($N = 1\ 097$) и 92 % ($N = 367$). Кроме того, в данном исследовании проводилась классификация явлений молнии в виде облачных или наземных разрядов, а также в подобном же исследовании (но дополнительно с использованием независимых измерений формы волны электрического поля) в районе Колорадо/Канзас/Небраска (Fleenor et al., 2009).

Эффективность обнаружения удара от облака в землю и вспышки также исследовалась, используя в качестве контроля данные о молнии, спровоцированной ракетой, в районе Флориды (Jerauld et al., 2005; Nag et al., 2011). По результатам самого последнего (2004—2009 гг.) исследования эффективность обнаружения удара от облака в землю и вспышки составила соответственно 76 % ($N = 139$) и 92 % ($N = 37$). Разряды во вспышках, спровоцированных ракетами, подобны регулярным последующим импульсам (следующих

по ранее сформированным каналам) в природной молнии, и поэтому 76 % эффективности обнаружения разряда применимо только к регулярным отрицательным последующим импульсам в природной молнии. Предполагается, что эффективность обнаружения вспышки, полученная при использовании молнии, спровоцированной ракетой, является недооценкой истинной величины для природных отрицательных вспышек молнии, так как первые импульсы обычно имеют большие максимальные токи, чем последующие.

Nag и Rakov (2012) исследовали волновые формы электрического поля, вызванного 45 положительными вспышками, которые содержали 53 импульса. Из этих 53 импульсов сеть NLDN определила местоположение 51 (96 %), из которых 48 (91 %) были правильно идентифицированы, а 3 возвратных разряда (импульса) были неправильно классифицированы, как облачные разряды.

В соответствии с работой Cummins и Murphy (2009) эффективность обнаружения облачной вспышки сетью NLDN (вспышка считалась обнаруженной, если был обнаружен, по меньшей мере, один импульс ОНЧ/НЧ, вызванный вспышкой) находится в диапазоне 10—20 % в зависимости от локальных различий в расстояниях между станциями. Nag et al. (2010) исследовали широкополосные электрические поля, производные электрических и магнитных полей и узкополосные ОБЧ (36 МГц) всплески излучения, вызванные 157 компактными внутриоблачными разрядами. Сетью NLDN было определено местоположение 150 (96 %) этих CID и правильно идентифицировано 149 (95 %) из них, как облачные разряды.

По оценкам Nag et al. (2011), сравнившим данные о местонахождениях развития молний по сообщениям NLDN с точно известными местами нахождения пусковых ракетных установок, которые были приняты в качестве достоверных наземных точек поражения молнией, медианная абсолютная погрешность местонахождения составляет 308 м, при этом самая большая погрешность равна 4,2 км ($N = 105$). Ошибки определения максимального тока оценивались по результатам сравнения максимальных токов из сообщений NLDN с непосредственно измеренными токами у основания канала триггерной молнии. Медианная абсолютная ошибка величины тока составила 13 % ($N = 96$). Ошибки величины тока никогда не превышали 129 % по абсолютной величине (60 %, при условии исключения двух выбросов). Эти результаты применимы только к регулярным отрицательным последующим ударам в молнии в природных условиях.

6.5.3 Сеть определения местоположения молнии, 1—200 кГц

Основным методом определения местонахождения, используемым в сети определения местоположения молнии (LINET), является ВП, хотя датчики магнитного поля предоставляют информацию об угле поступления сигнала, которая используется для проверки достоверности данных компьютерного расчета местоположения. Информация о высоте, определяемая по времени поступления сигнала на ближайший передающий датчик, используется как дополнение для классификации процессов в облачных вспышках и процессов, происходящих внутри облака (например, предварительный пробой) при наземных вспышках (CG), с одной стороны, и в наземных ударах (CG) с другой стороны (предполагается, что расположение вблизи земли связано с ударами по направлению от облака к земле, а на высоте со всеми другими процессами). Установлено, что надежное разделение возвратных ударов и импульсов в облаке может быть достигнуто, пока ближайший датчик находится в радиусе 100 км от разряда молнии, что требует базисных линий 200—250 км или меньше. Особое внимание уделяется обнаружению сигналов низкой амплитуды, как для внутриоблачных молний, так и по направлению от облака к земле. Максимальные токи для процессов внутриоблачных вспышек и для процессов внутри облака (например предварительный пробой) в наземных вспышках (CG), и наземные удары (CG) оцениваются, предполагая прямую пропорциональность между пиковым током и пиковым магнитным (или электрическим) полем и обратную пропорциональность для расстояния до пика поля. Больше информации о системе LINET можно найти в работе Betz et al. (2009) и цитируемой справочной литературе.

Подобно системам, формирующим изображение в канале ОВЧ, неясно, как определить эффективность обнаружения для сети LINET, которая в известной мере также отображает эволюцию каналов молнии, хотя и со значительно меньшим числом обнаруженных источников на вспышку. Кроме того, процессы в облаке (например предварительный пробой) для вспышек при наземных разрядах определяются по категории чисто облачных молний, которые явно не соответствуют традиционным определениям облачной вспышки, как разряда молнии без удара в землю (CG), и вспышек при наземном разряде, обусловленных как процессами внутри облака, так и влиянием ударов по направлению от облака к земле (CG). Это вероятно не играет никакой роли для таких применений, как слежение за очагом и распознавание явлений суровой погоды.

Считается, что случайная ошибка определения местонахождения составляет примерно 150 м, но наличие систематических ошибок подтверждается. Betz et al. (2009) продемонстрировали пример с 58 обнаруженными ударами, очевидно завершившимися на инструментальной башне со средней ошибкой определения местонахождения менее, чем 100 м, после компенсации систематических ошибок, что привело к отклонению местоположения на 200 м.

Погрешности оценки максимальных токов для сети LINET неизвестны (на сегодняшний день сравнений с наземными контрольными данными не проводилось).

6.5.4 **Сеть точного обнаружения молний США, 1,5—400 кГц**

Сеть точного обнаружения молний США (USPLN) использует метод ВП ОНЧ/НЧ и состоит из 100 датчиков электрического поля, охватывающих континентальную часть США и другие районы Северной Америки. Не сообщалось о каких-либо формальных исследованиях по тестированию рабочих характеристик, касающихся этой системы, однако операторы системы утверждают, очевидно, по результатам анализа с использованием моделирования системы, об эффективности обнаружения разрядов 95 % и типовой ошибке определения местонахождения в 250 м на большей части Северной Америки (> 80 % эффективность обнаружения и < 1 км ошибка определения местонахождения для основных районов установки в других регионах мира). Различие между процессами внутри облака и по направлению от облака к земле, по всей видимости, установлено за счет изучения частотного спектра и амплитуды полученных сигналов. Процедура преобразования поля в ток не была формально описана, а также отсутствует какая-либо информация о проверке ее обоснованности.

6.5.5 **Мировая сеть грозового оповещения, 1 Гц — 12 МГц**

Датчики мировой сети грозового оповещения (ENTLN) работают в диапазоне частот от 1 Гц до 12 МГц (охватывая диапазоны КНЧ, ОНЧ, НЧ, СЧ и ВЧ). Метод ВП использовался этой сетью с более чем 700 датчиками с 2013 г. Регистрируются разряды молний, как внутриоблачные, так и наземные (CG).

Согласно работе Нескман и Liu (2010) полные сигналы волнового электрического поля передаются датчиком в блок обработки данных и используются как для обнаружения молниевых событий, так и для различения внутриоблачных процессов и процессов по направлению от облака к земле. Удары (или отдельные явления в облаке) концентрируются во вспышку, если они в пределах 700 мс и 10 км первого обнаруженного удара (или облачного события). Вспышка, которая содержит, по меньшей мере, один возвратный удар классифицируется как вспышка по направлению от облака к земле, иначе она классифицируется как облачная вспышка. При отслеживании очага и подготовке оповещения о грозе, используются только вспышки (которые с меньшей вероятностью будут пропущены системой, чем удары).

В отношении этой системы не сообщалось о каких-либо формальных исследованиях тестирования рабочих характеристик в рецензированной литературе, однако операторы системы утверждают, что по результатам исследования по тестированию рабочих

характеристик сеть ENTLN достигает эффективности обнаружения облачных вспышек молний 40—50 % на большей части США и до 95 % на Среднем Западе и в восточной части США (Heskman и Liu, 2010). Максимизирование эффективности обнаружения облачных вспышек молнии, по-видимому, является основной целью этой системы. Расширяя диапазон частот обнаружения до спектров СЧ и ВЧ, сеть ENTLN ставит целью обнаруживать и сообщать о более слабых импульсах на больших расстояниях, чем другие системы ОНЧ/НЧ с подобными базисными линиями.

Процедура преобразования поля в ток не была формально описана на сегодняшний день, а также пока еще отсутствует какая-либо информация о тестировании ее обоснованности.

6.5.6 **Мировая сеть определения местоположения молний, 6—18 кГц**

В Мировой сети определения местоположения молний (WWLLN) используется метод регистрации времени получения группы сигналов (ВПГ) для определения местонахождения ударов молнии. Этот метод основан на том, что сигналы ОНЧ-молнии (сферики), распространяясь в волноводном канале ионосферы Земли, подвергаются дисперсии, которая заключается в том, что более высокочастотные компоненты прибывают раньше, чем низкочастотные компоненты. ВПГ — величина, которая может быть получена из измеренной волновой формы сферика, связана с расстоянием, пройденным сфериком. По состоянию на март 2012 г., в сети WWLLN использовалось 57 датчиков, расположенных на всех континентах, хотя, в соответствии с работой Dowden et al. (2002), глобальный охват может обеспечиваться в принципе лишь 10 датчиками. Расстояние между датчиками составляет порядка тысяч километров. В настоящее время только те молниевые события, которые были зарегистрированы, по меньшей мере, пятью датчиками и которые имеют остаточные явления (неопределенность времени удара) менее или равные 30 мкс, считаются обнаруженными с допустимой точностью.

В последнем исследовании рабочих характеристик сети WWLLN в работе Abarca et al. (2010) использовались данные сети NLDN в качестве контрольных. Было определено, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле возросла примерно с 3,9 % в 2006-2007 гг. до 10,3 % в 2008-2009 гг., так как количество датчиков увеличилось с 28 в 2006 г. до 38 в 2009 г. Для явлений с максимальными токами 130 кА и выше, по сообщениям NLDN, эффективность обнаружения составляла 35 %. Средняя погрешность локализации оценивалась в 4—5 км.

Взаимодействие сигналов молнии с ионосферой спектрально искажает полученную волновую форму, поэтому вывести максимальное значение тока и даже полярность молнии не так просто. Тем не менее, Hutchins et al. (2012) разработали метод преобразования излучаемой мощности удара в полосе 6—18 кГц в максимальный ток. Погрешности, связанные с таким преобразованием, в настоящее время неизвестны.

6.5.7 **Глобальный набор данных по молниям, ОНЧ**

Глобальный набор данных по молниям (GLD360), на который также ссылаются как на Глобальную сеть обнаружения молний (GLDN), использует точно не установленное число датчиков ОНЧ, которые, следуя определенной стратегии, расположены по всему миру. Информацию о местоположениях получают, используя одновременно методы ВП и МП вместе с алгоритмом распознавания волновой формы сигнала от молнии. Последний основан на базе канонических волновых форм, соответствующих расстояниям распространения порядка тысяч километров (Said et al., 2010).

Согласно операторам сети, ожидаемая эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле (CG) составляет 60—70 %, а медианная ошибка определения местонахождения составляет 5—10 км. Demetriades et al. (2010) выполнили оценку рабочих характеристик GLD360, используя данные сети NLDN в качестве наземных контрольных данных, и обнаружили, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле составляла от 86 % до 92 %, а медианная ошибка

определения местонахождения была 10,8 км. По результатам подобного исследования, но с использованием Бразильской сети обнаружения молнии, Naccarato et al. (2010) сообщили, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле составляла 16 %, а средняя ошибка определения местонахождения была 12,5 км. Используя синхронизированные измерения электрического поля и скоростную съемку видеокамерой молнии от облака к земле в качестве привязки, в Бельгии было обнаружено (Poelman et al., 2013), что эффективность обнаружения вспышки и удара по направлению от облака к земле согласно GLD360 составляет соответственно 96 % и 70 % при медианной ошибке определения местонахождения 900 м. Используя данные сети NLDN в качестве привязки, Said et al. (2013) сообщают об эффективности обнаружения вспышки от облака к земле 57 % и медианной ошибке определения местонахождения 2,5 км.

Набор GLD360 также содержит данные о максимальных токах и полярности. Относительно сети NLDN, Said et al. (2013) обнаружили, что арифметическая и геометрическая средняя ошибка магнитуды максимального тока для GLD360 составляет соответственно 21 % и 6 %. По сообщениям GLD360, такая же полярность регистрировалась для 96 % совпадающих ударов, что и в сообщениях NLDN.

6.5.8 Система обнаружения молний, фиксирующая разницу во времени наступления события

Система обнаружения молний, фиксирующая разницу во времени наступления события (ATDnet) обнаружения молний на большом расстоянии (LLS), является самой последней версией ОНЧ LLS Метеобюро СК, которая работает с 1987 г. Система в настоящее время состоит из 10 датчиков, расположенных по всей Европе, которые вносят вклад в основную сеть, и дополнительных датчиков в Европе и за ее пределами для развития и тестирования. Сеть спроектирована для локализации молний в Европе, но способна обнаруживать молнии в Африке и Южной Америке на регулярной основе. Датчики, на которые ссылаются как на удаленные, обнаруживают волновые формы сигнала (сферика) ОНЧ и передают данные о волновой форме в центральный процессор в Метеобюро СК, где используется метод корреляции волновой формы для определения разницы во времени поступления волновой формы по сети. Эти данные по разнице времени поступления используются для локализации молнии.

Poelman et al. (2013) обнаружили, что случайная ошибка сети ATDnet определения местоположения составляет порядка 1 км при эффективности обнаружения вспышки от облака к земле 88 %. Фактическая медианная погрешность определения местоположения вспышек по направлению от облака к земле (CG) в Европе, вероятно, порядка 2—5 км, хотя это требует верификации в рецензируемой литературе. Сеть ATDnet в настоящее время не предоставляет информации о полярности удара, типе (по направлению от облака к земле/внутриоблачная) (CG/IC) или о мощности/максимальном токе.

6.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ МОЛНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ СЛУЖБАМИ

Данные о молниях могут применяться в различных областях, имеющих значение для государственных и частных организаций по предоставлению метеорологического обслуживания. Как правило, национальные метеорологические учреждения используют данные системы LLS в целях содействия выполнению своих национальных обязанностей по защите жизни и собственности, а коммерческие организации используют данные о молниях для предоставления улучшенных предупреждений о явлениях суровой погоды, прогнозов и руководящих указаний пользователям для специализированных видов применения, включая авиацию, сельское хозяйство, энергетику и средства массовой информации.

6.6.1 Распознавание бурь и оповещения о явлениях суровой погоды

Одна из важных обязанностей метеорологических служб заключается в предоставлении надежных предупреждений об условиях суровой погоды. Как правило, самая высокая оправдываемость прогнозов явлений суровой погоды и наиболее низкие показатели сигналов ложной тревоги достигаются при использовании нескольких источников данных, но так как грозовые бури, по большей части, сопровождаются возрастанием молний в облаке (IC), данные LLS сами по себе могут обычно служить в качестве очень четкого индикатора силы и протяженности грозовых очагов. Это указывает на важность сетей обнаружения всех молний, таких, которые обнаруживаются в диапазонах частот НЧ/СЧ/ВЧ, так как обнаружение только молний по направлению от облака к земле не является достаточным для этого применения.

Хотя сигнал тревоги может быть подан сразу при ударе поблизости от района с измерительным прибором, более надежная процедура включает определение грозового очага и его отслеживание по мере его продвижения внутрь района, представляющего интерес или по направлению к нему. Некоторые системы LLS позволяют выполнить краткосрочную экстраполяцию (текущая погода) смещений очагов порядка 1 час или около этого. Посредством мониторинга полной частоты вспышек и ее изменений, можно определить очаги молний потенциального формирования явлений суровой погоды. При определении очага и когда общий показатель молнии превышает данную пороговую величину, можно подавать сигнал тревоги.

За исключением определенных грозовых систем, образующихся вдоль фронтальных границ, прогнозирование на сроки большей длительности с допустимой оправдываемостью требует использования численных моделей прогноза погоды. Наконец, можно отметить, что молния наряду с прослеживанием очага грозы не только указывает на инициирование сильной грозовой деятельности, но также дает сигнал о прекращении угрозы в данном районе.

Несмотря на то, что сообщения наблюдателей о грозе на земной поверхности или в атмосфере являются неоценимым источником информации во время явлений суровой погоды, информация, полученная дистанционными методами (включая обнаружение молний), постоянно приобретает все большее значение. В настоящее время можно использовать радиолокационное отражение, снимки облачности, пассивные микроволновые яркостные температуры и данные о молниях (по отдельности или в комбинации) для определения грозовой деятельности с большей точностью и надежностью даже в отдаленных районах. Из всех этих методов, глобальные и/или локальные сети систем LLS и автономные детекторы на земле или на воздушном судне явно являются наиболее оптимальными для идентификации значительной грозовой деятельности по причинам, рассмотренным выше. Хотя простое обнаружение грозы можно осуществить с помощью любой системы LLS, более полные измерения требуют продвинутых систем и методов, которые способны обеспечить заблаговременное обнаружение и идентификацию грозовой деятельности на ранней стадии, сокращая в то же время сигналы ложных тревог до приемлемого уровня.

6.6.2 Текущая погода, прогнозирование и производная продукция

Прогнозирование текущей погоды представляет широко используемый метод для задач сверхкраткосрочного прогнозирования. Прогноз текущей погоды начинается с информации о текущем состоянии (метеорологических условиях) атмосферы, выраженном одним или несколькими наблюдаемыми параметрами, а затем используется оценка их изменения для предсказания их местонахождения и протяженности через короткое время в будущем. Точность прогноза текущей погоды зависит от обоснованности предположения, что погода, связанная с наблюдавшимся (наблюдавшимися) параметром(ами), будет продолжаться в течение этого периода без существенного изменения. Безусловно, определенные параметры молнии указывают на фазу жизненного цикла гроз, и это также может использоваться для прогнозирования текущей погоды. Это вышеупомянутое предположение обоснованно для кратких (~1 ч) периодов, но

его обоснованность уменьшается со временем. В результате, экстраполяции на более длительные периоды, чем около 1 ч, требуют использования методов усвоения данных и численного прогнозирования погоды.

Качественные оценки данных LLS обычно связаны с предоставлением данных о молниях на картах (вместе с другой информацией или без нее) в реальном или близком к реальному масштабам времени. Эта продукция может использоваться для многих целей, таких как локализация или ограничение района, который будет, вероятно, затронут грозой, и помощь в принятии решения о выпуске предупреждения об опасности. Кроме качественной оценки, высококачественные данные LLS хорошо поддаются количественной обработке, включая статистические оценки частоты ударов для определения силы грозы, которые могут существенно повысить их практическую ценность.

В настоящее время выполняется ряд проектов, направленных на развитие автоматических процедур слежения за очагом грозы и оценки молниевых параметров в этих районах. Усовершенствованные интерпретации, анализ и анимационное представление результатов слежения за очагом должны, в значительной мере, повысить потенциал данных LLS в отношении прогнозирования текущей погоды. Сочетание слежения за очагом, включая, как молнию, так и радиолокатор, представляет другой тип потенциально полезной производной продукции.

В заключение, данные о молниях, так же, как и другие наблюдения, такие как радиолокационная отражаемость, могут использоваться для создания статистики выходной продукции модели в целях объективного прогнозирования (Glahn и Lowry, 1972; Knipffer, 1996), подходящей для использования в вероятностных методах последующей обработки, подобно методам, описанным для почасовой модели быстрого обновления данных численного прогноза погоды (ЧПП) Рапида Рефреша, разработанной Лабораторией по исследованиям системы Земля НУОА, США (Weygandt et al., 2008).

6.6.3 Молнии и климат

В последних исследованиях климата отмечается связь между молниями и изменением климата (Williams 2005; Price, 2006, 2009). По мере повышения температуры у земной поверхности и в нижней тропосфере, прогнозируется увеличение частоты молний в диапазоне 10—100 % для каждого градуса потепления поверхности в зависимости от использованной модели и предположений. Имеется также явная связь между температурой, водяным паром и молниевой активностью; грозы могут переносить большое количество водяного пара в верхние слои тропосферы и нижние слои стратосферы, а это, в свою очередь, влияет на парниковый эффект, затрагивая климат Земли. Кроме того, разряды молнии образуют окиси азота, которые влияют на образование парникового газа озона. Следует, однако, признать, что даже несмотря на то, что лежащие в основе механизмы, связывающие изменение климата с молниями, хорошо поняты, различные процессы могут доминировать непредвиденным образом. Например, моделирование климата, выполненное Grewe (2008), позволяет предположить, что глобальное потепление может фактически привести повсеместно к уменьшению количества случаев конвективных явлений, но к событиям более интенсивным. В итоге, частота молний уменьшается в общей повторяемости вспышек, однако прогнозируется, что отдельные грозы вызовут большее количество молний.

В любом случае грозовая активность является одним из факторов, который следует принимать во внимание в любой подробной климатической модели или предсказаниях изменения климата. Соответственно поэтому важно проводить мониторинг грозовой активности в различных масштабах на огромных территориях и создать или расширить базу данных о молниевых явлениях в течение длительных временных периодов. Также следует изучать взаимосвязи для коротких временных масштабов в диапазонах ежедневных и суточных изменений, 5-суточных волн, внутрисезонных, полугодовых и годовых до более длительных периодов. Для достижения этой цели, необходимо расширить локальные высокоточные системы LLS, завершить создание глобальных LLS, внедрить и осуществить стандарты по обнаружению молний.

6.6.4 Проверка наземного ущерба, вызванного молниями

Ранняя мотивация развития системы LLS вынуждена была иметь объективный способ проверки причины ущерба, вызванного молниями, в юридических спорах, и большинство страховых компаний используют данные о молниях для проверки или отклонения претензий в отношении ущерба, нанесенного молнией. Для того, чтобы быть полезной в этом отношении, система LLS должна продемонстрировать, как прекрасную эффективность обнаружения, так и точность локализации на всех пороговых уровнях. Точность локализации должна быть лучше, чем ~1 км, с тем, чтобы можно было продемонстрировать хорошую корреляцию между молнией и повреждениями, и должны обнаруживаться относительно слабые удары, так как даже удар 5 кА может вызвать значительное повреждение или бросок напряжения. Необходима даже более высокая точность локализации для энергетической промышленности для того, чтобы определить мог бы быть обрыв высоковольтной линии электропередачи вызван ударом молнии. Поскольку сильные грозы могут вызывать высокую частоту ударов, а вспышки молнии могут состоять из многих ударов с различными точками их попадания, желательна точность 100—200 м для определения надежной пространственной корреляции. Безусловно, это требование является не таким строгим при наличии информации о точном сроке явления, как в отношении сбоя в электроснабжении, так и времени ударов, и в настоящее время средства для автоматического признания этих событий доступны на коммерческой основе.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Abarca, S.F., K.L. Corbosiero and T.J. Galarneau Jr., 2010: An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18).
- Betz, H.D., K. Schmidt and W.P. Oettinger, 2009: LINET – An international VLF/LF lightning detection network in Europe. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.
- Biagi, C.J., K.L. Cummins, K.E. Kehoe and E.P. Krider, 2007: National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma in 2003–2004. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D5).
- Cummins, K.L. and M.J. Murphy, 2009: An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3):499–518.
- Demetriades, N.W.S., M.J. Murphy and J.A. Cramer, 2010: Validation of Vaisala's Global Lightning Dataset (GLD360) over the continental United States. *Preprints*, Twenty-ninth Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (10–14 May 2010), Tucson, AZ.
- Dowden, R.L., J.B. Brundell and C.J. Rodger, 2002: VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(7):817–830.
- Dwyer, J.R., 2005: A bolt out of the blue. *Scientific American*, 292(5):64–71.
- Fleenor, S.A., C.J. Biagi, K.L. Cummins, E.P. Krider and X.-M. Shao, 2009: Characteristics of cloud-to-ground lightning in warm-season thunderstorms in the Central Great Plains. *Atmospheric Research*, 91:333–352.
- Glahn, H.R., and D.A. Lowry, 1972: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 11:1203–1211.
- Grewe, V., 2008: Impact of lightning on air chemistry and climate. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.
- Heckman, S. and C. Liu, 2010: The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction. In: *Proceedings of the International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2010) and Fourth International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)* (November 2010), Salvador, Brazil.
- Hendry, J., 1993: Panning for lightning (including comments on the photos by M.A. Uman). *Weatherwise*, 45(6):19.
- Hutchins, M.L., R.H. Holzworth, C.J. Rodger and J.B. Brundell, 2012: Far-field power of lightning strokes as measured by the World Wide Lightning Location Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29:1102–1110.
- Jerauld, J., V.A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, D.M. Jordan, K.L. Cummins and J.A. Cramer, 2005: An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D19).
- Knüpffer, K., 1996: Methodical and predictability aspects of MOS systems. *Preprints of the Thirteenth Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences* (21–23 February 1996), San Francisco, CA. American Meteorological Society, 190–197.
- Le Vine, D.M., 1980: Sources of the strongest RF radiation from lightning, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C7):4091–4095.
- Lojou, J.-Y., M.J. Murphy, R.L. Holle and N.W.S. Demetriades, 2008: Nowcasting of thunderstorms using VHF measurements. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.
- Mardiana, R. and Z.-I. Kawasaki, 2000: Broadband radio interferometer utilizing a sequential triggering technique for locating fast-moving electromagnetic sources emitted from lightning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49(2):376–381.
- Morimoto, T., A. Hirata, Z. Kawasaki, T. Ushio, A. Matsumoto and J.H. Lee, 2004: An operational VHF broadband digital interferometer for lightning monitoring, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 124(12):1232–1238.
- Naccarato, K.P., O. Pinto Jr., S.A.M. Garcia, M. Murphy, N. Demetriades and J. Cramer, 2010: *Validation of the new GLD360 dataset in Brazil: First results*. Twenty-first International Lightning Detection Conference (19–22 July 2010), Orlando, Florida.

- Nag, A., S. Mallick, V.A. Rakov, J.S. Howard, C.J. Biagi, J.D. Hill, M.A. Uman, D.M. Jordan, K.J. Rambo, J.E. Jerauld, B.A. DeCarlo, K.L. Cummins and J.A. Cramer, 2011: Evaluation of U.S. National Lightning Detection Network performance characteristics using rocket-triggered lightning data acquired in 2004–2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2).
- Nag, A. and V.A. Rakov, 2012: Positive lightning: An overview, new observations, and inferences. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D8).
- Nag, A., V.A. Rakov, D. Tsalikis and J.A. Cramer, 2010: On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14).
- Orville, R.E., 2008: Development of the National Lightning Detection Network, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(2):180–190.
- Poelman, D.R., W. Schulz and C. Vergeiner, 2013: Performance characteristics of distinct lightning detection networks covering Belgium. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(5):942–951.
- Price, C., 2006: Global thunderstorm activity. In: *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* (M. Fullekrug, E. Mareev and M. Rycroft, eds.). Springer, Amsterdam, 85–99.
- Price, C., 2009: Will a drier climate result in more lightning? *Atmospheric Research*, 91(2):479–484.
- Rakov, V.A., 1999: Lightning electric and magnetic fields. In: *Proceedings of the Thirteenth International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility* (16–18 February 1999), Zurich, Switzerland.
- Rakov, V.A. and M.A. Uman, 2003: *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press.
- Said, R.K., M.B. Cohen and U.S. Inan, 2013: Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(13) (available from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50508/pdf>).
- Said, R.K., U.S. Inan and K.L. Cummins, 2010: Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D23).
- Shao, X.M., D.N. Holden and P.R. Krehbiel, 1996: Broadband radio interferometry for lightning observation. *Geophysical Research Letters*, 23:1917–1920.
- Smith, D.A., X.M. Shao, D.N. Holden, C.T. Rhodes, M. Brook, P.R. Krehbiel, M. Stanley, W. Rison and R.J. Thomas, 1999: A distinct class of isolated intracloud discharges and their associated radio emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D4): 4189–4212.
- Thomas, R.J., P.R. Krehbiel, W. Rison, S.J. Hunyady, W.P. Winn, T. Hamlin and J. Harlin, 2004: Accuracy of the Lightning Mapping Array. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).
- Weygandt, S.S., M. Hu, S.G. Benjamin, T.G. Smirnova, K.J. Brundage and J.M. Brown, 2008: *Assimilation of lightning data using a diabatic digital filter within the Rapid Update Cycle*. Twentieth International Lightning Detection Conference (21–23 April 2008), Tucson, AZ.
- Williams, E., 2005: Lightning and climate: A review. *Atmospheric Research*, 76:272–287.
-