

04

©1993 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРИОБЛАЧНЫХ РАЗРЯДОВ МОЛНИИ

Н.И.Петров, Г.Н.Петрова

Введение

Одной из важнейших особенностей молниевых разрядов является случайное поведение его траектории. От степени искривления и ветвления канала молнии зависят характеристики электромагнитного и акустического излучений, величина нейтрализованного заряда, амплитуда тока обратного удара и т.д. Существует несколько типов молниевых разрядов. Большинство разрядов происходит целиком внутри облака [1]. Такие разряды называются внутриоблачными. Внутриоблачные разряды обычно возникают между положительно и отрицательно заряженными областями внутри грозового облака. В отличие от молний между облаком и землей эти разряды изучены значительно меньше, поскольку их труднее фотографировать и изучать с помощью оптических средств. Представляют интерес выяснение начальных условий, приводящих к тому или иному типу молниевых разрядов, а также физических механизмов зарождения и распространения лидера внутри облака, и определение характеристик внутриоблачных вспышек и самого грозового облака. Исследование молнии, как правило, проводится экспериментальными методами. Математическому моделированию распространения молниевых разрядов уделяется значительно меньше внимания. В последние годы стало известно, что разветвленные фигуры траекторий разряда возможно описать как объект нецелой размерности — фрактал [2,3]. Такой подход позволяет ввести количественные характеристики, определяющие внутренние свойства разряда, и объяснить ряд его особенностей, в частности закономерности появления разветвлений и искривлений канала пробоя. Модель электрического разряда, основанная на теории фракталов, впервые была рассмотрена в [3]. В [4] стохастическая модель применялась для рассмотрения процесса развития лидерного разряда в газах. Были получены имитационные картины траекторий пробоя для различных значений воздействующего напряжения и изучены их статистические характеристики. В [5] фрактальный подход был предложен для моделирования траектории молниевых разрядов.

В настоящей работе фрактальная модель применяется для моделирования траектории молнии с учетом внутриоблачных разрядных процессов и встречного разряда с заземленных объектов. С помощью численного моделирования на ЭВМ получены имитационные картины траекторий пробоя для различных значений потенциала и полярности облака, радиуса грозового облака и длины ступени лидера.

Постановка задачи

Опишем кратко модель формирования молниевое разряда. Распространение молнии рассматривается как дискретизированный процесс. Разрядный промежуток разбивается координатной сеткой со стороны квадрата, равной длине ступени l . Здесь для простоты рассматривается двумерный случай. Точки координатной сетки, через которые проходит разряд, принимаются находящимися под потенциалом U . Потенциал U равен потенциалу облака U_0 , уменьшенному на величину падения напряжения вдоль канала. Величина падения напряжения определяется длиной канала и напряженностью электрического поля в канале E_k . Вероятность пробоя связи пропорциональна локальному электрическому полю в области фронта в степени η

$$p \sim E^\eta, \eta > 0. \quad (1)$$

На каждом шаге развития потенциалы U_{ij} в узлах решетки определяются путем решения уравнения Лапласа $\nabla^2 U = 0$ методом итераций по формуле [3]

$$U_{ij} = 1/4[U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}]. \quad (2)$$

Это повторяется до тех пор, пока напряженность поля для всех возможных направлений развития разряда не уменьшится до такой величины, что все вероятности не станут равными нулю. Фрактальную размерность D , определяющую степень искривленности и разветвленности траектории разряда, можно определить, вычисляя число пробитых связей M , содержащихся в сфере радиуса R при различных R [2]

$$M(R) \sim \int_0^R \rho(r) r^{(d-1)} dr \sim R^D, \quad (3)$$

где d — размерность пространства, ρ — плотность распределения пробитых связей.

Отсюда следует, что плотность распределения внедренного заряда $\rho(r)$ удовлетворяет закону

$$\rho(r) \sim r^{-(d-D)}. \quad (4)$$

Выбор параметров расчета и модели грозового облака

Основными параметрами, характеризующими данную модель распространения молнии, являются следующие: E^* — критическая напряженность поля, при которой выполняются условия для распространения лидера; E_k — напряженность поля в канале лидера; l — длина ступени; $p \sim E^\eta$ — вероятность образования ступени лидера, где η — параметр, характеризующий чувствительность вероятности p к напряженности поля; U_0 — потенциал облака; R — радиус облака.

Критическая напряженность поля E^* , определяющая распространение лидера в воздухе, равна напряженности электрического поля в стримерной зоне $E_{стр}$, которая в случае положительного лидера составляет $E_{стр} = 5$ кВ/см [6,7]. Для отрицательного лидера напряженность электрического поля в стримерной зоне составляет $E_{стр} \approx 10$ кВ/см [8]. Напряженность поля в канале лидера E_k зависит от длины канала и падает с ее увеличением. При возрастании длины промежутка с 10 до 100 м напряженность поля E_k изменяется в пределах 0.5–0.2 кВ/см [9]. Длина ступени l принимается равной длине стримерной зоны лидера $l_{стр}$. Длина стримерной зоны растет с увеличением длины промежутка H . Так, при изменении длины промежутка от 6 до 65 м длина стримерной зоны изменяется от 0.6 до 3 м [7]. При дальнейшем увеличении длины промежутка H длина стримерной зоны насыщается. В молнии характерные длины стримерной зоны изменяются в пределах 10–100 м. Параметр η , характеризующий чувствительность вероятности образования ступеньки лидера к напряженности электрического поля, в данном случае выбирается в пределах $\eta = 0.10 - 0.25$. Потенциал облака выбирается исходя из геометрических размеров облака и критической напряженности поля для зарождения лидера.

В качестве модели грозового облака рассматривается дипольная структура распределения электрических зарядов. Известно [1], что обычно верхняя часть облака заряжена преимущественно положительно, а нижняя часть — отрицательно, т.е. грозовое облако представляет собой электрический диполь. Кроме основных зарядов могут быть небольшие области положительного заряда в основании грозового облака. Заряженные области диполя имеют геометрические размеры порядка нескольких километров. Верхнюю часть облака мы представляем в виде пространственно распределенного заряда с максимумом потенциала в середине облака. Нижняя часть представляется в виде сферически распределенного заряда.

Облачные разряды

Все виды разрядов, отличающиеся от разряда на землю, часто объединяются в одну группу и называются облачными разрядами I . Облачные разряды можно подразделить на внутриоблачные, межоблачные и разряды между облаком и окружающим воздухом. Однако в настоящее время экспериментальные данные, позволяющие идентифицировать разряды этих трех типов, отсутствуют. Записи электрических полей таких разрядов очень сходны между собой [10]. В ряде случаев вспышки, которые происходят в основном в пределах облака, сопровождаются образованием канала на землю, что также затрудняет идентифицирование разрядов.

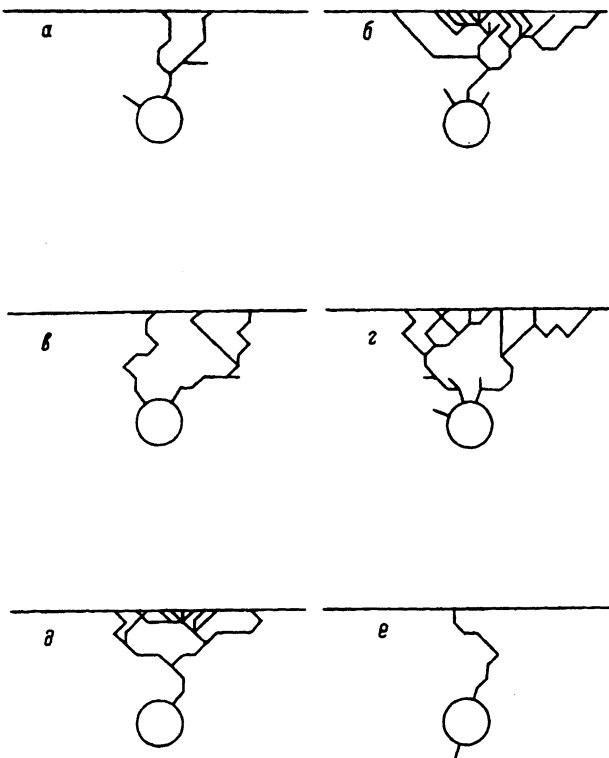


Рис. 1. Облачные разряды.
 $H = 150$ м, $R = 20$ м,
 $E_k = 0.07$ МВ/м;
 U_0 , МВ: а — 16, б — 23, в — 40,
 г — 45, д — 15, е — 15.5;
 η : а-г, е — 0.25, д — 0.125.

Ниже приводятся результаты математического моделирования облачных разрядов. На рис. 1, а-е представлены имитационные картины траекторий распространения разрядов молнии внутри облака при различных начальных условиях. На рис. 1, а и б показаны траектории разрядов при различных значениях потенциала облака U_0 . Видно, что увеличение потенциала облака приводит к росту числа ветвей разряда. Так, увеличение потенциала на 50% привело к росту общей длины канала пробоя L более чем в 3 раза. При отрицательной полярности облака для получения такой же картины, что и при положительной полярности, потенциал облака нужно увеличить приблизительно в 2 раза (рис. 1, в, г). Сложность геометрической картины разряда зависит также от значения параметра η , характеризующего чувствительность вероятности искривления и ветвления к напряженности электрического поля. Так, при уменьшении параметра η в 2 раза общая длина канала разряда увеличилась в 3.6 раза (рис. 1, д, е).

Разряды между облаком и землей

Разряды между облаком и землей исследованы гораздо шире других видов разрядов. Для них существует достаточное количество измерений параметров тока и заряда [11]. Как было показано выше, при увеличении потенциала облака степень ветвления облачных разрядов возрастает. При дальнейшем росте потенциала облака разряд завершается образованием канала на землю (рис. 2). На рис. 2, а и б представлены

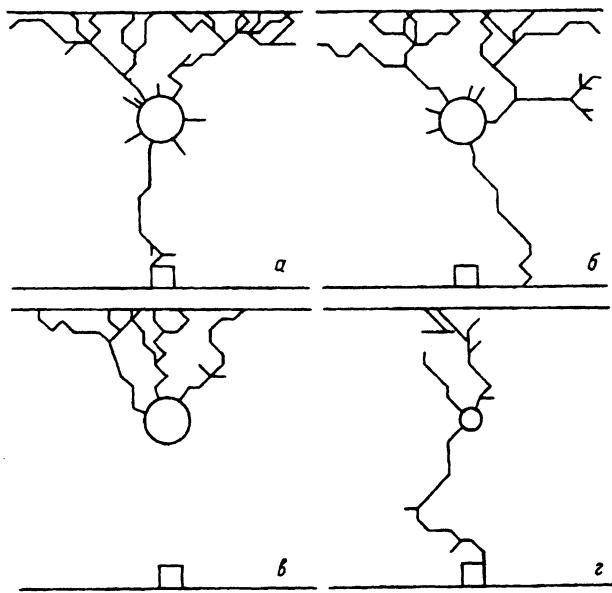


Рис. 2. Разряды между облаком и землей.

$\eta = 0.25$;
 U_0 , МВ: $a, b - 25$; $c, d - 220$;
 H , м: $a, b - 150$; $c, d - 1500$;
 R , м: $a, b - 20$; $c - 200$, $d - 100$;
 E_k , МВ/м: $a, b - 0.07$; $d - 0.02$.

картины траекторий разряда, когда потенциал облака U_0 и расстояние между облаком и землей одни и те же. Отметим, что фрактальная размерность D при этом не изменяется, хотя каждый отдельный разряд распространяется случайным образом. Практически не изменяется при этом также общий заряд Q , внедренный разрядом в пространство, или общая длина канала разряда L . Случайный характер поведения траектории от разряда к разряду позволяет моделировать ориентировку молнии на изолированные и заземленные объекты. Из рис. 2, c, d видно, что траектория молнии ориентируется случайным образом на объект, расположенный на поверхности земли.

При заданном потенциале облака U_0 разряд может происходить лишь внутри облака или завершиться на землю в зависимости от геометрических размеров грозовой ячейки, откуда зарождается молниевый разряд (рис. 2, a, b). Как видно, разряд завершается на землю при меньшем радиусе грозовой ячейки, когда достигается большее усиление на ее границе. При больших радиусах грозовой ячейки разряд происходит с перенапряжением, что обусловлено необходимостью повышения потенциала облака для выполнения условия зарождения лидера.

Разряды, развивающиеся вверх от поверхности Земли

Разряды, движущиеся снизу вверх, относительно редки и обычно развиваются от вершин гор и искусственных сооружений большой высоты. Кроме того, движущиеся вверх лидеры могут возникать также в случае искусственно инициированной молнии [1]. Распространяющиеся вверх положительно заряженные лидеры часто достигают границы облака [1]. Обычно лидер, распространяющийся вверх, переносит положительный заряд, что обусловлено меньшим значением критической напряженности электрического поля для зарождения и распространения положительно го лидера.

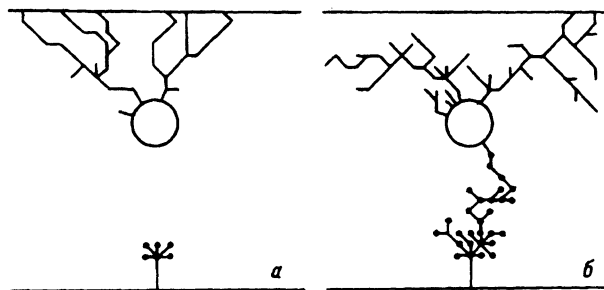


Рис. 3. Разряды, распространяющиеся вверх от поверхности земли.

Сплошные линии — внутриоблачные разряды отрицательной полярности, точки — встречный разряд положительной полярности со стержня высотой $h = 30$ м, $a - U_0 = -45$, $b - 50$ МВ.

На рис. 3, *a, б* представлены траектории движущихся вверх положительных разрядов при различных значениях потенциала облака. Для рассматриваемой геометрии разряд сначала развивается внутри облака, где достигаются большие значения напряженности электрического поля по сравнению с областью между облаком и землей. Наличие усиления электрического поля на конце стержня, расположенного на поверхности земли, приводит к зарождению положительной “лидерной” короны, развивающейся вверх (рис. 3, *a*). Однако условия для дальнейшего распространения лидера не выполняются, так как достаточное усиление поля имеет место лишь вблизи стержня. При повышении потенциала облака всего лишь на 10% разряд с поверхности земли развивается вверх и проникает в облако (рис. 3, *б*).

Физическая картина

Физическая картина формирования и распространения молниевых разрядов может быть представлена в следующем виде. Разряд зарождается с ячейки облака, где достигается критическая напряженность электрического поля E . Дальнейшее развитие разряда зависит от структуры пространственного распределения зарядов в облаке и от расстояния между облаком и поверхностью земли. Если длина электрического диполя в облаке меньше расстояния до поверхности земли, то происходит развитие древовидной структуры разряда внутри облака. Канал же пробоя между облаком и землей менее разветвленный, поскольку он развивается в менее слабом электрическом поле. При увеличении длины диполя степень разветвленности траектории разряда внутри облака уменьшается. Таким образом, древовидная структура разряда внутри облака связана с наличием перенапряжения. При одном и том же потенциале облака разряд может быть как завершенным, так и незавершенным или лишь внутриоблачным в зависимости от геометрических размеров грозовой ячейки. Действительно, при заданном потенциале облака U_0 существует критический радиус облака $R_{кр}$, при котором возможно зарождение лидера $R_{кр} \approx U_0/E^*$. При потенциале облака $U_0 = 50$ МВ и $E^* = 5 \cdot 10^5$ В/м получаем, что $R_{кр} = 100$ м. Заряд такой грозовой ячейки равен $Q \approx 4\pi\epsilon_0 E^* R^2 \approx 0.6$ Кл. Заряд же нейтрализации, регистрируемый при обратном ударе, существенно больше этой величины. Известно [1], что максимальные заряды, нейтрализуемые разрядами молнии, достигают до 350 Кл. Таким образом, при обратном ударе нейтрализуется заряд с большей области, чем одна ячейка облака, с которой зарождается разряд. Ветвление канала разряда обуславливается наличием перенапряжения или внедрением заряда, достаточного для одновременного обра-

зования двух ветвей. Общая длина канала разряда также определяется степенью перенапряжения, причем большую часть длины траектории молнии составляют внутриоблачные разряды. Это позволяет объяснить большую величину нейтрализуемого суммарного заряда при обратном ударе молнии, определяемого общей длиной канала пробоя $Q \simeq q_n \cdot L$, где q_n — погонный заряд лидерного канала. Погонный заряд q_n лидера определяется длиной стримерной зоны $l_{\text{стр}}$ и составляет величину порядка $q_n \sim 2\pi\epsilon_0 E_{\text{стр}} l_{\text{стр}} \sim 300$ мкКл/м при длине $l_{\text{стр}} \simeq 10$ м. Такого же порядка величина погонного заряда получается из анализа экспериментальных данных [12]. Отсюда получаем, что при величине нейтрализуемого заряда $Q \simeq 30$ Кл суммарная длина канала пробоя будет составлять $L \simeq 100$ км.

Обсуждение и заключение

Полученные картины траекторий пробоя описывают основные особенности наблюдаемых молниевых разрядов: существование завершенных и незавершенных разрядов, возрастание степени разветвленности при увеличении потенциала облака, а также форму каналов, по которым происходит пробой.

Фрактальная модель позволяет выяснить закономерности появления ветвлений и искривлений траектории молнии. Так, число ветвей, пересекающих сферу данного радиуса, изменяется по следующему закону:

$$N(R) \sim \frac{dM(R)}{dR} \simeq R^{(D-1)}, \quad (5)$$

т.е. растет с увеличением пройденного расстояния. Определенным закономерностям подчиняется также зависимость плотности точек ветвления $\rho_+(R)$ и свободных концов канала пробоя $\rho_-(R)$, находящихся в окружности радиуса R . Если $N(r)$ — число линий разряда, пересекающих окружность данного радиуса, $\rho_{\pm}(r)$ — радиальная плотность точек ветвления (+) и свободных концов (-), а $L(r)$ — полная длина линий разряда в окружности радиуса r , то выполняются следующие соотношения подобия:

$$L(r) \sim r^D, \quad N(r) \sim r^{D-1}, \quad \rho_{\pm} \sim r^{D-2}. \quad (6)$$

Таким образом, несмотря на случайный характер получаемых траекторий разряда, существуют количественные критерии для сравнения теоретических результатов с экспериментальными. Из сравнения с экспериментом может быть найдено и значение параметра η .

Количественной характеристикой, сохраняющейся от разряда к разряду при одинаковых начальных условиях, является фрактальная размерность D . Это указывает на ее связь с механизмом формирования траектории лидера, обусловленным внутренними свойствами разряда. Как отмечалось в [4], физической причиной, порождающей стохастическую природу процесса пробоя, является нелинейность системы, а не внешние случайные изменения параметров среды (давление, плотность, температура). Действительно, нелинейность в динамических системах может привести к стохастической неустойчивости, имеющей фрактальную природу [13]. Отметим, что фрактальная размерность растет с увеличением степени ветвления и искривления траектории пробоя и изменяется в

пределах $1 < D < 2$ и $2 < D < 3$ в двумерном и трехмерном случаях соответственно.

Структура канала разряда определяется в основном потенциалом облака и пространственным распределением зарядов в облаке. Поэтому по картине траектории разряда можно определить характеристики грозового облака. Так, древовидная форма траектории разряда в облаке определяется дипольной структурой распределения зарядов и обусловлена наличием перенапряжения в облаке. От формы траектории молнии зависит также характеристики электромагнитного излучения. Поэтому возможно определение параметров облака по измерениям излучения, причем излучение также обладает фрактальными свойствами [14].

Рассматриваемая модель позволяет исследовать ориентировку молнии на изолированные и заземленные объекты, в частности определять зависимости вероятности поражения от длины стримерной зоны и параметров облака с учетом влияния встречного разряда с объекта.

Грозовое облако представляет собой ячеистую структуру. Критические размеры грозовой ячейки, с которой развивается разряд, существенно меньше размера всего грозового облака. Таким образом, при обратном ударе нейтрализуется заряд многих грозовых ячеек. Отметим, что ячейки длиной 50–200 м с различной плотностью избыточного заряда были обнаружены также при самолетном зондировании кучевых облаков, перерастающих в грозовые 15. Полная длина канала молнии существенно больше расстояния между облаком и землей, причем большая часть длины траектории расположена внутри облака. Отсюда следует, что механизм отбора заряда из облака при обратном ударе не связан со снятием его непосредственно с заряженных частиц, составляющих грозовое облако. Нейтрализация заряда обусловлена переходными процессами разряда уже сформированного канала лидера. При этом имеют место два различных механизма нейтрализации внедренного пространственного заряда: стримерный и дрейфовый, которые определяют импульсную и непрерывную составляющие тока обратного удара [14].

Из рассмотренного следует, что разделение разрядов молнии на облачные, между облаком и землей, и т.д. является условным. Тип разряда зависит лишь от параметров облака и геометрии разрядного промежутка и не обуславливается различием физических процессов, происходящих в них. Основное влияние на форму разряда оказывают такие характеристики грозового облака, как длина электрического диполя в облаке и геометрические размеры, потенциал грозовой ячейки, с которой зарождается лидер. Эти параметры определяют наличие или отсутствие перенапряжения, от которого зависит степень ветвления и искривления канала молнии.

В заключение авторы благодарят участников Московского семинара, руководимого И.М.Бортником, за полезное обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Юман М.А. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 12. С. 5–12.
- [2] Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988.
- [3] Niemeyer L., Piotronero L., Wiesmann H.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 1033–1036.
- [4] Петрова Н.И., Петрова Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 14–18.
- [5] Petrov N.I., Petrova G.N. // Proc. 9th Int. Conf. on Atm. Electr. St. Petersburg, 1992. Vol. 3. P. 675–679.

- [6] Куцаенко В.В., Лупейко А.В., Петров Н.И., Чернов Е.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 23. С. 53-56.
- [7] Chernov E.N., Lupeiko A.V., Petrov N.I. // Proc. 7th Int. Symp. on High Volt. Eng. Dresden, 1991. Vol. 4. P. 141-144.
- [8] Les Renardieres Group. Electra. 1981. N 74. P. 67-216.
- [9] Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
- [10] Ogawa T., Brook M. // J. Geophys. Res. 1964. Vol. 69. P. 5141-5150.
- [11] Utan M.A., Krider E.P. // IEEE Trans. 1982. Vol. EMC-24. N 2. P. 78-111.
- [12] Александров Г.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 4. С. 744-747.
- [13] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988. 368 с.
- [14] Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеопиздат, 1970. 210 с.
- [15] Petrov N.I. // Proc. 9th Int. Conf. on Atm. Electr. St. Petersburg, 1992. Vol. 1. P. 368-371.

Всероссийский электротехнический институт
Истра
Московская область

Поступило в Редакцию
16 июня 1992 г.