

Физические механизмы развития молниевых разрядов между грозовым облаком и ионосферой

© Н.И. Петров, Г.Н. Петрова

Высоковольтный научно-исследовательский центр,
143500 Истра, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 12 мая 1998 г.)

Исследовано влияние изменения атмосферного давления с высотой и геометрии грозовых облаков на развитие молний, распространяющихся вверх к ионосфере. Показано, что механизм развития высотных молний не отличается от механизма формирования и распространения обычных молний между грозовым облаком и землей. Установлено, что формирование высотных молний обусловлено уменьшением давления с высотой и возможно лишь с грозовых облаков, расположенных на больших высотах.

Исследование физических механизмов развития разрядов между грозовым облаком и ионосферой, обнаруженных недавно с искусственных спутников и названных молниями на больших высотах [1,2], важно как с научной точки зрения, так и для выяснения их влияния на характеристики ионосферы. В качестве механизмов, ответственных за развитие высотных молний, обычно рассматриваются распространение стримеров в квазиэлектростатическом поле грозового облака [3,4] и пробой на убегающих электронах [5,6]. В первом случае инициирование и развитие молнии происходят без участия каких-либо внешних факторов, во втором на инициирование молний оказывают влияние космические лучи, порождающие высокоэнергичные электроны, которые в свою очередь, попадая в область высоких напряженностей электрического поля грозового облака, ускоряются и создают поток вторичных лавин. В пользу второго механизма говорят факты о том, что в грозовом облаке значения электрических полей на порядок меньше пробойных и зарождение разрядов при отсутствии каких-либо факторов объяснить не удастся. Однако этот механизм требует экспериментального подтверждения. Первый механизм, наоборот, имеет место в лабораторных экспериментах. Накоплен большой экспериментальный материал, подтверждающий электрическую природу формирования и развития лидерного разряда в длинных воздушных промежутках. Однако лабораторные эксперименты проводятся, как правило, в неоднородных промежутках с заданной геометрией электродов и при давлениях, близких к нормальному. Поэтому представляется необходимым исследование влияния эффектов изменения атмосферного давления с высотой на формирование и развитие высотных молний. Кроме того, необходимо также исследовать влияние геометрии грозового облака на формирование таких разрядов.

В настоящей работе исследовано влияние изменения атмосферного давления с высотой и геометрии грозового облака на формирование и развитие разрядов молний от вершин грозового облака к ионосфере. Показано, что высотные молнии могут быть объяснены в рамках

существующих представлений о механизмах развития стримерного и лидерного разрядов.

На развитие высотных молний влияют изменение давления, влажность атмосферы, а также геометрия грозового облака. Исследование разрядных процессов в зависимости от этих параметров является важным для выяснения физических механизмов развития высотных молний.

В качестве модели грозового облака рассмотрим дипольную структуру распределения электрических зарядов. Известно [7], 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.

Изменение давления с высотой выражается зависимостью [8]

$$p(z) = p(0) \exp \left\{ -\frac{\ln 10}{18400} \cdot z \right\}, \quad (1)$$

где $p(0)$ — давление на уровне моря, z — высота над уровнем моря в метрах.

Существует пороговое поле для пробоя, определяемое равенством частот ионизации и прилипания. Для воздуха это поле составляет $E_{\text{dis}}^*/p \approx 24 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{Pa})$. Следует отметить, что такие поля необходимы для зарождения стримерного разряда или лавинно-стримерного перехода, а не для распространения стримеров. Такие значения полей могут иметь место вблизи микроненормальностей (дождевые капли, заряженные частицы и т.д.) в грозовом облаке. Известно [9], что развитие стримерного разряда, предшествующего формированию лидерного разряда, зависит от давления воздуха, причем критическая напряженность электрического поля, необходимая для распространения стримеров, уменьшается с уменьшением давления. Измерения в длинных воздушных промежутках показывают, что при атмосферном давлении положительные стримеры распространяются в

поле $E_{str}^* \approx 5 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{Pa})$ [10]. На высоте 20 km, где давление составляет $p = 8.2 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, критическое поле для распространения стримеров будет равно $E_{str}^* \approx 41 \text{ kV}/\text{m}$.

Для зарождения молниевых разрядов необходимо, чтобы было выполнено условие стримерно-лидерного перехода. Обычно это условие выполняется, если напряженность электрического поля на длине стримерной зоны лидера превышает критическое значение $E \geq E^* = E_{str}^*$. Поскольку напряженность электрического поля падает с расстоянием от грозного облака, то условие стримерно-лидерного перехода выполняется лишь при превышении критического значения потенциала (заряда) грозного облака. Однако на больших высотах условие для распространения стримеров может быть выполнено на существенно больших расстояниях от грозного облака вследствие экспоненциального уменьшения давления с высотой. Для равномерно заряженного грозного облака сферической формы поведение напряженности электрического поля может быть выражено следующим образом:

$$E = \frac{\rho R_0^3}{3\varepsilon_0 r^2}, \quad r > R_0, \quad (2)$$

где R_0 — радиус грозного облака, ρ — объемная плотность зарядов, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$ — диэлектрическая постоянная.

Измерения показывают, что плотность объемного заряда в грозных облаках достигает $\rho \approx 4 \text{ nC}$, а напряженность электрического поля $|E_{\max}| \approx 50\text{--}100 \text{ kV}/\text{m}$ [11].

На рис. 1 представлена зависимость изменения величины $E(z)/p(z)$ с расстоянием z от верхнего края грозного облака. Видно, что падение давления с высотой приводит к более медленному уменьшению величины E/p с расстоянием, а на больших высотах эта величина становится даже больше, чем вблизи грозного облака. Такая зависимость поведения величины E/p от высоты приводит к тому, что развитие разряда вверх от

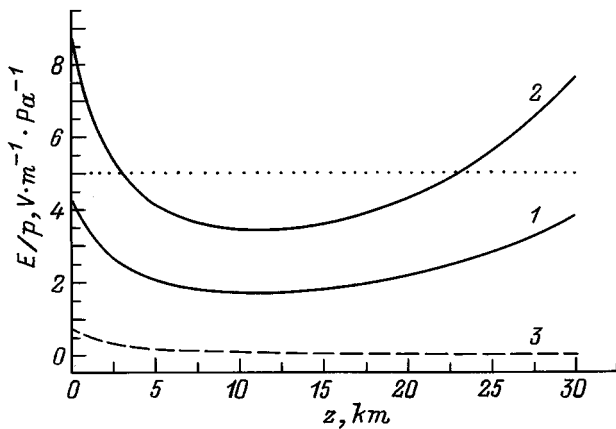


Рис. 1. Изменение величины E/p с расстоянием z от грозного облака с радиусом $R_0 = 5 \text{ km}$ при различных значениях заряда облака Q при высоте верхней части грозного облака над поверхностью земли $h = 20 \text{ km}$: $p(z) = 1 \text{ atm} = \text{const}$; $Q = 100$ (1); 200 C (2, 3).

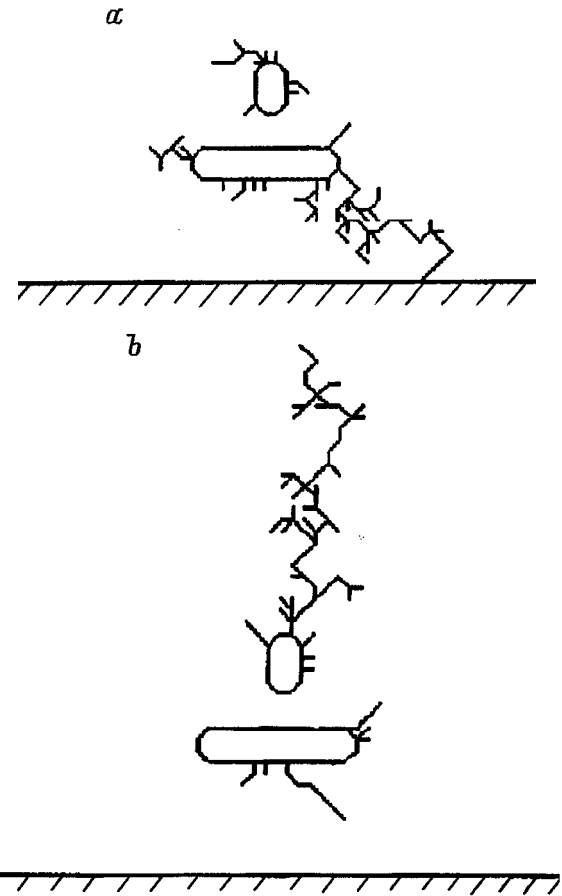


Рис. 2. Имитационные картины траекторий пробоя без учета изменения атмосферного давления с высотой (a) и с учетом изменения давления (b).

грозного облака становится более предпочтительным, чем к земле. Это подтверждается и приведенными ниже расчетами.

Для моделирования высотных молний будем использовать методику, основанную на теории фракталов [12,13]. В [12] эта методика была применена для моделирования формирования молнии с учетом внутриоблачных разрядов. Однако влияние изменения давления с высотой при этом не учитывалось. Здесь фрактальная методика используется для моделирования молниевых разрядов при различных значениях потенциала, заряда и высоты грозного облака над поверхностью земли без учета и с учетом изменения атмосферного давления с высотой. Изменялись также форма и размеры грозного облака. На рис. 2 представлены имитационные картины траекторий пробоя с грозных облаков, расположенных на различных высотах. Расчеты показывают, что основное влияние на формирование направленных вверх молний оказывает изменение давления с высотой над уровнем моря. Развитие молний вверх становится более предпочтительным, когда верхняя часть грозного облака находится на высоте порядка 20 m и выше. Это подтверждается и наблюдениями [2]. Поскольку обычно облака

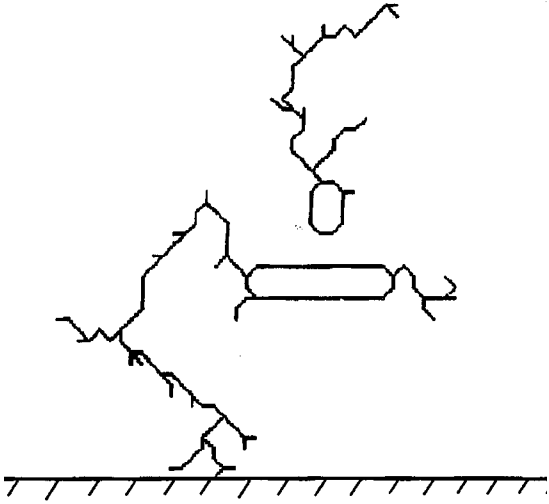


Рис. 3. Имитационная картина траектории молнии, развивающейся одновременно по направлению к земле и вверх.

располагаются ниже, то высотные молнии наблюдаются реже, чем разряды между облаком и землей. При определенных соотношениях между параметрами грозового облака и его высотой возможно развитие разрядов как по направлению к земле, так и вверх (рис. 3).

Физическая картина развития высотных разрядов во многом аналогична так называемым незавершенным разрядам, наблюдающимся в длинных воздушных промежутках. При этом разряды "blue jets" качественно соответствуют развитию стримерной зоны положительного лидера, а "red sprites" — процессам в стримерной зоне отрицательного лидера. Так, минимальная скорость распространения положительной стримерной короны в воздухе [14] и скорость распространения фронта светимости разряда "blue jets" совпадают ($v \approx 10^5$ м/с). Совпадают они и по геометрической форме. Отметим, что стримерная зона положительного лидера представляет собой конусообразную область, заполненную разветвленной структурой каналов стримеров, на фронтах которых достигается усиление поля, достаточное для ионизации. Такая же тонкая структура должна наблюдаться в разрядах "blue jets". В работах [3,4] разряды "blue jets" представляются как развитие одного стримерного канала. Однако такая модель некорректна, поскольку поле на фронте такого стримера недостаточно для ионизации.

Разряды "red sprites", как правило, имеют место вслед за положительными молниями [2], развивающимися от облака к земле. Они наблюдаются на гораздо больших высотах, чем разряды "blue jets". Проникновение квазиэлектростатического поля грозового облака на больших высотах мало вследствие большой проводимости среды. Поэтому на большие высоты проникает лишь быстро изменяющееся поле. Такое поле может создаваться разрядами, направленными к земле. Качественно разряды "red sprites" очень похожи на разряды с плазменных образований, формирующихся на фронте стримерной зо-

ны отрицательного лидера в лабораторных экспериментах в атмосфере. Механизм формирования плазменных образований в настоящее время неизвестен. Их формирование возможно вследствие воздействия электромагнитного поля молнии большой мощности. Однако можно предположить, что природа формирования плазменных сгустков в лабораторных экспериментах и в высотных молниях одна и та же. Одним из наиболее вероятных механизмов может быть фокусировка стримеров (плазменных нитей) в неоднородном электрическом поле. Дело в том, что стримерные образования поляризуются во внешнем электрическом поле, т.е. приобретают дипольные моменты. Дипольные моменты приобретают также частицы в грозовом облаке. Это способствует их фокусировке в области сильного поля. Оценки, сделанные из условия равенства сил кулоновского отталкивания и сил притяжения дипольных моментов, показывают, что этот механизм не противоречит данным наблюдения. Этот же механизм может привести к формированию ячеек в грозовом облаке. Известно, что грозовое облако представляет собой ячейковую структуру. Ячейки с различной плотностью избыточного заряда были обнаружены также при самолетном зондировании кучевых облаков, перерастающих в грозовые [15]. В этих зонах с избыточной плотностью заряда, по-видимому, и зарождаются молнии.

Представляют интерес определение параметров высотных разрядов и сравнение их с параметрами разрядов в лабораторных условиях. Так, используя теорему Гаусса, по известной величине напряженности электрического поля на границе стримерной зоны E_{str} можно оценить заряд, внедренный стримерной зоной лидера,

$$Q_{str} = \epsilon_0 \oint E dS \approx 2\pi\epsilon_0 E_{str} l_{str}^2 \left(1 - \cos \frac{\Omega}{2}\right), \quad (3)$$

где Ω — угол раскрытия при вершине стримерной зоны, l_{str} — длина стримерной зоны, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная.

Напряженность электрического поля на фронте положительной стримерной зоны на высоте 40 км составляет $E_{str}^* \approx 3.4$ кВ/м. Угол раскрытия стримерной зоны обычно равен $\Omega \approx 15^\circ$ [4]. Длина стримерной зоны составляет $l \approx 20$ км. Подставляя эти значения в формулу (3), получаем, что заряд стримерной зоны равен $Q \approx 0.7$ С. Отсюда для средней концентрации электронов получаем $n_e \approx 10^7$ м⁻³. В лабораторных разрядах заряд стримерной зоны обычно составляет $Q \sim 10^{-5}$ С. Оценки, полученные из прямых измерений оптической светимости высотных разрядов, составляют $n_e \approx 10^7$ м⁻³, т.е. согласуются с нашими результатами. Интенсивность оптического излучения разрядов определяется плотностями молекул воздуха и скоростями возбуждения и излучательных переходов [16] и может быть выражена через концентрацию зарядов n_e следующим образом [4]:

$$I \approx 2 \cdot 10^{-2} \frac{n_e}{(1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot n_e^{1/2})}, R.$$

Подставляя сюда среднее значение для концентрации зарядов $n_e \approx 10^{-7} \text{ m}^{-3}$, получаем интенсивность излучения $I \approx 10^5 R$ ($1R = 10^{10} \text{ photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), что также согласуется с прямыми измерениями.

Таким образом, на развитие высотных молний существенное влияние оказывает изменение давления с высотой, причем существуют критические значения потенциала для заданного размера грозového облака, при которых возможно формирование разряда. Этим объясняется наблюдение молний, развивающихся от вершины облаков к ионосфере лишь на больших высотах, превышающих 20 km, где давление атмосферы более чем в 10 раз меньше давления на уровне моря.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-16382-а).

Список литературы

- [1] *Boeck W.L.* et al. // *Geoph. Res. Lett.* 1992. Vol. 19. P. 99–102.
- [2] *Boeck W.L.* // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 1465–1475.
- [3] *Pas'ko V.P., Inan U.S., Bell T.F.* // *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23. N 3. P. 301–304.
- [4] *Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P., Rycroft M.J.* // *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23. N. 13. P. 1625–1628.
- [5] *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roissel-Dupre R.* // *Phys. Lett. A.* 1992. Vol. 165. P. 463–468.
- [6] *Ивановский А.В.* // Письма в ЖТФ. 1996, Т. 22. Вып. 12. С. 6–11.
- [7] *Krider E.P., Uman M.A.* // *IEEE Trans.* 1982. Vol. EMC-24. N 2. P. 79–112.
- [8] Справочник. Физические величины / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [9] *Phelps C.T., Griffiths R.F.* // *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47. N 7. P. 2929–2934.
- [10] *Петров Н.И., Аванский В.Р., Бомбенкова Н.В.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 6. С. 50–60.
- [11] *Rust W.D.* et al. // *Proc. 9th Intern. Conf. on Atm. Electr. St.-Petersburg*, 1992. Vol. 1. P. 160–165.
- [12] *Петров Н.И., Петрова Г.Н.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 4. С. 41–49.
- [13] *Petrov N.I., Petrova G.N.* // *Ga URSI. Abstracts. Lille (France)*, 1996. P. 230.
- [14] *Петров Н.И., Аванский В.Р., Бомбенкова Н.В.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 23. С. 34–38.
- [15] *Имянитов И.М.* Электрфикация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 210 с.
- [16] *Chamberlain J.* *Physics of the Aurora and Airglow.* New York: Academic Press, 1961.