

УДК 523.165

## РОЛЬ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБРАЗОВАНИИ МОЛНИЙ

В. И. Ермаков<sup>1</sup>, Ю. И. Стожков

*В работе показано, что в образовании молний одну из ключевых ролей играют высокоэнергичные заряженные частицы космических лучей, которые производят колонную ионизацию воздуха. При наличии в грозовом облаке достаточно сильного электрического поля  $\sim 3$  кВ/см в ионизованных следах этих частиц происходит электрический пробой воздуха и следы становятся электропроводящими. Через систему следов, обладающую минимальным сопротивлением, проходит лидер или предразряд молнии. За ним немедленно следует так называемый возвратный удар – основной молниевый разряд, который переносит отрицательный заряд из облака на землю или с поверхности земли в облако.*

Молния представляет собой мощный кратковременный разряд в атмосфере, длина которого обычно измеряется километрами. Наиболее часто молнии появляются внутри грозового облака и значительно реже – между облаком и поверхностью земли.

Разряд молнии между облаком и землей представляет собой один или более следующих друг за другом частичных разрядов (импульсов). Обычно это 3 – 4 импульса с характерной длительностью около 40 мкс каждый, разделенных характерным интервалом около 40 мс. Каждый импульс состоит из лидера (предразряда) и возвратного удара. Именно лидеры прокладывают путь для импульсов. Лидер, предшествующий первому импульсу, носит название ступенчатого, а лидеры, предшествующие последующим импульсам, называются стреловидными [1, 2]. Они появляются в атмосфере при

<sup>1</sup>Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный, Московской области.

напряженности электрического поля около  $3 \text{ кВ/см}$  [3], что на порядок ниже значения напряженности поля для электрического пробоя воздуха при нормальных условиях ( $E \sim 30 \text{ кВ/см}$ ). Поля с  $E \approx 30 \text{ кВ/см}$  в свободной атмосфере не наблюдаются.

В теории грозы вопрос о возникновении лидеров молний является наименее изученным. В последние годы была предложена гипотеза инициирования молний (образования лидеров) галактическими космическими лучами [4–6]. Однако детальное изучение этой гипотезы не было проведено. Настоящая работа частично восполняет этот пробел.

*Космические лучи в атмосфере Земли.* На верхнюю границу атмосферы Земли непрерывно падает изотропный поток галактических космических лучей (первичное излучение). Он состоит преимущественно из протонов (их в потоке около 85%) и других заряженных ядер с энергиями от  $\sim 10^7 \text{ эВ}$  до  $\sim 10^{20} \text{ эВ}$ . Поток космических лучей  $\sim 1 \text{ частица}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , а средняя энергия частиц  $\sim 10^{10} \text{ эВ}$ . Энергетический спектр космических лучей падающий, т.е. с увеличением энергии частиц их поток уменьшается.

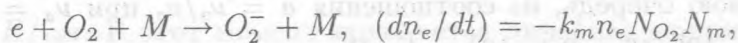
При взаимодействии с ядрами атомов воздуха космические лучи рождают новые высокоэнергичные частицы (вторичное излучение), большинство из которых являются заряженными. В их число входят вновь образуемые протоны, электроны и мюоны. Толщина атмосферы достаточна для того, чтобы в ней произошло до десятка последовательных столкновений первичной частицы с ядрами атомов воздуха.

Космические частицы сверхвысоких энергий ( $\epsilon \geq 10^{12} \text{ эВ}$ ) рождают в атмосфере Земли широкие атмосферные ливни (ШАЛ'ы). Частицы с энергией  $\epsilon \geq 10^{15} \text{ эВ}$  рождают ливни, доходящие до поверхности земли. Эти ливни характеризуются следующими параметрами. Продольный размер ливня  $L \sim 10 - 20 \text{ км}$ , а средний поперечный  $R \sim 100 \text{ м}$ . От оси ливня вторичные частицы разлетаются на сотни метров до  $\sim 1 \text{ км}$ . Максимум числа частиц, рожденных ливнем, лежит на высоте, соответствующей массе столба воздуха  $X_m(\epsilon) = (70.15 \cdot \lg(\epsilon) - 555.5) \text{ г/см}^2$ , где  $\epsilon$  выражено в  $\text{эВ}$  [7]. Большинство ливней, доходящих до поверхности земли, образуется частицами с энергией  $\sim 10^{15} \text{ эВ}$ , а максимум числа частиц в этих ливнях находится на высоте около  $5 \text{ км}$ . Максимумы ливней, образуемых частицами с энергией около  $10^{12} \text{ эВ}$ , находятся на высоте около  $10 \text{ км}$ . Число ливней на высоте  $10 \text{ км}$  примерно в 30–50 раз больше числа ливней на уровне земли. Число высокоэнергичных заряженных частиц, рождаемых в ливне, лежит в пределах от сотен тысяч до миллиарда [8].

*Колонная ионизация воздуха высокоэнергичными частицами.* Заряженные частицы первичного и вторичного излучений, проходя через атмосферу, производят так называемую колонную ионизацию воздуха, которая наблюдается в следах этих частиц. Образованные частицей электроны и ионы внутри следа распределены радиально согласно кривой Гаусса, уменьшаясь в концентрации от максимума в центре наружу. Вследствие диффузии след частицы со временем разрастается в ширину. В течение первых 100 мкс с момента прохождения частицы радиус следа порядка  $2 \cdot 10^{-3}$  см [9].

Коэффициент ионизации воздуха  $\alpha$  электроном с  $\varepsilon \geq 1$  МэВ (или число электрон-ионных пар, рождаемых в следе единичной длины) можно рассчитать следующим образом. Ионизационные потери однозарядной релятивистской частицы в воздухе равны  $1.8$  МэВ  $\cdot$  см<sup>2</sup>/г [8], нормальная плотность воздуха равна  $1.29$  кг/м<sup>3</sup>, поэтому на пути в  $1$  см частица теряет энергию  $\sim 2.3$  кэВ. На образование одной электрон-ионной пары частица расходует энергию  $\sim 35$  эВ [8], поэтому коэффициент ионизации  $\alpha \approx 66$  пар/см.

Достаточно быстро происходят потери рожденных электронов из-за их прилипания к молекулам электроотрицательных газов воздуха, преимущественно к молекулам кислорода  $O_2$ . Прилипание электронов к молекулам  $O_2$  происходит в тройных столкновениях в соответствии с уравнением



где роль третьей частицы  $M$  выполняют преимущественно молекулы  $O_2$ ,  $N_2$  и  $H_2O$ . Экспериментальные значения констант скоростей реакций  $k_m$  при комнатной температуре равны:  $k_{O_2} = 2.5 \cdot 10^{-30}$  см<sup>6</sup>с<sup>-1</sup>,  $k_{N_2} = 0.16 \cdot 10^{-30}$  см<sup>6</sup>с<sup>-1</sup>,  $k_{H_2O} = 14 \cdot 10^{-30}$  см<sup>6</sup>с<sup>-1</sup> [10].

Оценим частоту прилипания  $\nu_a$  и соответствующее ей время жизни  $\tau_a = \nu_a^{-1}$  свободных электронов в насыщенном водяным паром грозовом облаке при давлении  $P = 1013$  кПа и температуре  $T = 273$  К:

$$\nu_a = k_{O_2}(N_{O_2})^2 + k_{N_2}N_{O_2}N_{N_2} + k_{H_2O}N_{O_2}N_{H_2O} = 1.1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}.$$

Здесь  $N_{N_2} = 2.1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{O_2} = 5.67 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{H_2O} = 1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. В соответствии с полученным значением  $\nu_a$  время жизни свободного электрона в грозовом облаке  $\tau_a = \nu_a^{-1} = 0.9 \cdot 10^{-8}$  с.

При наличии в грозовом облаке электрического поля с напряженностью  $E$  акты прилипания электронов происходят на фоне их дрейфа. Поэтому наряду с понятием частоты прилипания  $\nu_a$  в этом случае вводят понятие коэффициента прилипания  $a =$

$(\nu_a/v_g) \text{ см}^{-1}$  (здесь  $v_g$  – дрейфовая скорость электрона), который характеризует число прилипания, испытываемых электроном на 1 см дрейфового пути.

В случае наличия в грозовом облаке достаточно сильного электрического поля в ионизованных следах высокоэнергичных заряженных частиц может происходить размножение электронов в так называемых электронных лавинах. Размножение электронов в лавинах определяется разностью коэффициентов ионизации и прилипания  $\alpha_{эф} = \alpha - a$ . В случае, когда  $\alpha > a$ , размножение возможно, а если  $\alpha < a$  – нет. Это обстоятельство существенно влияет на порог электрического пробоя воздуха в ионизованном следе.

Наступление пробоя в ионизованном следе частицы возможно лишь при выполнении условия пробоя Мика, которое в упрощенной форме гласит:

$$\alpha_{эф}(E) \cdot d \approx (18 - 20); \quad N_e \sim 10^8,$$

где  $N_e$  – коэффициент усиления электронной лавины,  $d$  – единица длины.

Из этого условия следует, что электрический пробой воздуха в следе должен происходить при  $\alpha_{эф} \geq 20 \text{ см}^{-1}$ . Исходя из этого значения  $\alpha_{эф}$ , можно найти значение  $E$ , при котором в следах частиц будет происходить электрический пробой воздуха.

Из соотношения  $\alpha_{эф} = \alpha - a$  при  $\alpha_{эф} = 20 \text{ см}^{-1}$  и  $\alpha = 66 \text{ см}^{-1}$  находим, что  $a = 46 \text{ см}^{-1}$ . В свою очередь, из соотношения  $a = \nu_a/v_g$  при  $\nu_a = 1.1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$  находим, что  $v_g \approx 1.1 \cdot 10^8 / 46 = 2.4 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ . В воздухе при нормальном давлении такую дрейфовую скорость свободные электроны приобретают под действием электрического поля с напряженностью  $E \approx 3 \text{ кВ/см}$  [10]. Отсюда следует, что при напряженности электрического поля в грозовом облаке  $E \approx 3 \text{ кВ/см}$  в ионизованных следах высокоэнергичных заряженных частиц космических лучей должен наблюдаться электрический пробой воздуха. Самолетные наблюдения, которые были проведены Ганном в грозовых облаках, показали, что перед моментом появления молнии напряженность поля в облаке достигала значения  $\sim 3.2 \text{ кВ/см}$  и не более [3].

Длину ионизованного следа, оставляемого в воздухе высокоэнергичной частицей, при нормальном давлении можно рассчитать из соотношения  $L = \epsilon_0 / (2.3 \text{ кэВ} \cdot \text{см}^{-1})$ , а на высоте 1 км, где давление ниже, из соотношения  $L = \epsilon_0 / (2 \text{ кэВ} \cdot \text{см}^{-1})$ . Здесь  $\epsilon_0$  – энергия частицы. На высоте 1 км частицы с энергиями 1, 10 и 40 МэВ оставляют в воздухе ионизованные следы длиной 5, 50 и 200 метров. Электрическое поле грозового облака на длину следов практически не влияет. Это связано с тем, что в процессе движения заряженная частица практически всю накопленную энергию теряет при столкновениях. Электроны с указанными энергиями движутся со скоростями, близкими к скорости



исходит в течение характерного времени 50 мкс. Этот пробой возможен при условии появления в течение указанного интервала времени двух близко расположенных друг к другу ионизованных следов. Интенсивность космических лучей в нижней тропосфере составляет  $\sim 0.1$  частица/(см<sup>2</sup> · с). При такой интенсивности в течение 50 мкс одна частица падает на поверхность с площадью  $1/(0.1 \cdot 50 \cdot 10^{-6})$  см<sup>2</sup> = 200000 см<sup>2</sup>. Отсюда следует, что среднее расстояние между появившимися в интервале времени 50 мкс ионизованными следами равно  $\sqrt{200000 \text{ см}^2} \approx 5 \text{ м}$ .

В связи с тем, что вновь подключенный ионизованный канал становится электропроводящим, его потенциал принимает значение потенциала проводящей системы ШАЛ, равного  $\sim V/2$ . Далее происходит новый пробой воздуха между этим подключенным проводящим каналом и вновь образуемым ионизованным следом от другой высокоэнергичной частицы. Процесс подключения новых ионизованных следов продолжается до тех пор, пока проводящий канал, движущийся от облака, не достигнет проводящей поверхности земли. На этом формирование ступенчатого лидера заканчивается. Он проходит через систему следов, обладающую минимальным сопротивлением. Далее по проводящему каналу проходит так называемый возвратный удар. Во время этого удара электроны уходят из разветвленной проводящей системы облака и уменьшают имеющееся там электрическое поле до значения  $\sim 20 \text{ В/м}$ , при котором разряд гаснет [10]. Тем самым они производят нейтрализацию отрицательного избыточного объемного заряда, находящегося в облаке. Так происходит в случае нисходящей молнии, которая переносит отрицательный заряд из облака на поверхность земли. В случае восходящей молнии электроны уходят с поверхности земли в облако и производят в нем нейтрализацию положительного объемного заряда.

Проходящий по следам космических лучей лидер имеет ступенчатую форму, т.к. он составлен из следов различной длины. Скорость распространения разряда вдоль лидера различна. Она максимальна в ступени (или в следе частицы) и близка к скорости света. Поэтому ступень длиной в десятки и сотни метров высвечивается за время менее 1 мкс [1]. В то же время в промежутках между ступенями она порядка  $10^7$  см/с [10]. При такой скорости промежутки воздуха длиной 5 м пробиваются за время  $\sim 50$  мкс, что соответствует характерному наблюдаемому значению так называемой паузы между ступенями лидера. Во время пробоя канал светится значительно слабее, чем в ступени. Время прохождения лидером промежутка между облаком и землей в основном определяется временем пробоя промежутков между ступенями и составляет единицы миллисекунд. В отличие от лидера возвратный удар распространяется с большей скоростью, харак-

терная величина которой  $\sim 5 \cdot 10^7$  м/с [1].

После возвратного удара заканчивается первый разрядный импульс молниевой вспышки. Далее происходит остывание разрядного канала. Если за время  $\leq 100$  мс к этому каналу подключается система проводящих каналов нового ШАЛ'а, появившегося в облаке, то через него проходит второй разрядный импульс. Этому разряду предшествует так называемый стреловидный лидер, который проходит через систему проводящих каналов ШАЛ и неостывший канал предшествующего импульса. Число разрядных импульсов во вспышке молнии определяется числом ШАЛ'ов, подключаемых к неостывшему разрядному каналу первого импульса, а также величиной заряда, находящегося в облаке.

Кроме молний "облако-земля" существуют молнии внутриоблачные (их большинство) и молнии "облако-облако". Внутриоблачные молнии переносят заряды из одной части облака в другую по проводящим следам ШАЛ (значительно реже двух ШАЛ'ов, одновременно попадающих в облако). Аналогичные процессы происходят при молниевых разрядах "облако-облако".

*Заключение.* С учетом вышеизложенного, а также результатов наблюдений за грозowymi облаками [1, 2] и космическими лучами [8], можно заключить, что молнии проходят по ионизованным следам космических лучей. Они появляются при напряженностях электрического поля в облаке порядка  $3$  кВ/см, что на порядок ниже пробивного напряжения воздуха при нормальных условиях ( $E \approx 30$  кВ/см); имеют ступенчатую (или зигзагообразную) форму и ветвятся с преимущественным направлением вниз. При этом длины их ступеней лежат в пределах от единиц до сотен метров, что соответствует длинам пробегов вторичных частиц высокоэнергичных космических лучей в воздухе. Радиус объема, в котором молния нейтрализует заряд в облаке, составляет сотни метров, что соответствует радиусу разлета частиц ШАЛ'а, инициирующего появление молнии. Характерная высота, где зарождаются молнии "облако-земля" (порядка  $5$  км), соответствует характерной высоте максимумов числа частиц ливней, доходящих до поверхности земли ( $s \epsilon \geq 10^{15}$  эВ), а характерная высота внутриоблачных молний (порядка  $10$  км) соответствует высоте максимума общего числа ливней ( $s \epsilon \geq 10^{12}$  эВ). Молния бывает многоимпульсной в тех случаях, когда к неостывшему каналу предшествующего разрядного импульса новый ШАЛ подключает новую, содержащую объемный заряд область грозового облака. Период следования (десятки миллисекунд) и число разрядных импульсов молнии (от 1 до 26) определяются потоком ШАЛ'ов, падающих на грозовое облако, а также размерами находящегося в облаке объемного заряда. Без

ШАЛ'ов появление молний невозможно.

Следует обратить внимание на то, что попадание лидера в ту или иную точку поверхности земли носит чисто случайный характер. В том случае, когда лидер попадает на находящийся на поверхности земли сверхвысоковольтный изолятор, нейтрализация объемного заряда облака не происходит и поэтому разрядный импульс не развивается. Это следует учитывать при разработке технических средств молниезащиты различных объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] U m a n M. A. Lightning. Mc Graw-hill book company, New York, 1969 (имеется перевод: М. Юман. Молния. М., Мир, 1972).
- [2] C h a l m e r s J. A. Atmospheric electricity, Pergamon Press, Oxford, 1967 (имеется перевод: Дж. А. Чалмерс. Атмосферное электричество, Л., Гидрометеиздат, 1974).
- [3] G u n n R. J. Appl. Phys., **19**, 5 (1948).
- [4] Е р м а к о в V. I. Proceedings of 9th International Conference on Atmospheric Electricity, St-Petersburg, 1992, p. 485.
- [5] Е р м а к о в В. И. Наука и жизнь, N 7, 92 (1993).
- [6] Е р м а к о в В. И., С т о ж к о в Ю. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1, 23 (2003).
- [7] S t o z h k o v Y. I. Proceedings of 27th International Cosmic Ray Conference, Germany, Hamburg, 2001, HE, p. 487.
- [8] М у р з и н В. С. Введение в физику космических лучей. М., МГУ, 1988.
- [9] L o e b L. B. Basic Processes of Gaseous Electronics. 2d. Ed. Berkeley, 1960 (имеется перевод: Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л., ГИТТЛ, 1950).
- [10] Р а й з е р Ю. П. Физика грозового разряда. М., Наука, 1987.

Поступила в редакцию 18 сентября 2003 г.