

УДК 523.165

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ

В. И. Ермаков¹, Ю. И. Стожков

Изложен физический механизм образования грозových облаков, в котором космические лучи играют две ключевые роли. Они ионизируют воздух в тропо- и стратосфере и тем самым обеспечивают зарождение и развитие грозového облака. Кроме того, космические частицы сверхвысоких энергий ($\epsilon \geq 10^{14}$ эВ) образуют в атмосфере широкие атмосферные ливни (ШАЛ), которые инициируют появление молний. В работе рассмотрены процессы образования грозového облака, конденсации паров и макромасштабного разделения зарядов в нем, а также появления молниевых каналов, инициации разрядов и их влияния на конденсацию паров и электрическую активность облака. Показан процесс распада облаков.

По своим электрическим характеристикам облака подразделяются на грозовые и негрозовые. Обычно грозовым облаком называется такое кучево-дождевое облако, внутри которого или между ним и поверхностью Земли наблюдаются молнии. Наличие молний – главная отличительная особенность грозовых облаков от негрозовых.

Далее предложен физический механизм зарождения и развития грозového облака, который позволяет объяснить все (с нашей точки зрения) имеющиеся экспериментальные данные по наблюдениям грозовых облаков.

В данной работе мы рассматриваем процесс зарождения и развития одного грозového облака и не касаемся вопроса о глобальной грозовой активности, так называемой

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный, Московской области.

унитарной вариации (о ней идет речь в Фейнмановских лекциях, т. 5), которая зависит от мирового времени и объяснение которой известно.

Главной отличительной особенностью предлагаемого механизма от других является то, что в нем основным генератором разноименных электрических зарядов в облаке являются сильно разветвленные и сильно ионизованные каналы молний, а необходимые для зарождения облака и первых молний разноименные заряды образуются в воздухе космическими лучами (КЛ) и естественной радиоактивностью Земли.

Стадии развития грозового облака. Грозовые облака появляются при наличии в атмосфере мощных восходящих движений воздуха, которые возникают в зонах холодного фронта (динамическая конвекция), либо в результате неравномерного нагревания воздуха от термически неоднородной подстилающей поверхности (термическая конвекция).

Грозовое облако состоит из одной или нескольких отдельных ячеек, представляющих собой локализованные области резко выраженной конвективной и электрической активности. Средний радиус основания одной грозовой ячейки $R \approx 2$ км [1], вершина типичной грозовой ячейки расположена на высотах 8 – 12 км (в средних широтах). В гигантских грозовых облаках она может достигать 20 км [2]. Время жизни ячейки от момента ее зарождения до распада около часа.

Обычно развитие грозового облака делят на три стадии: роста, зрелости и распада. Стадия роста характеризуется наличием в облаке мощных восходящих потоков и появлением первых молниевых разрядов. В стадии зрелости, характеризующейся вначале восходящими, а затем и нисходящими потоками, грозовые разряды усиливаются, растет электрическая активность и водосодержание облака. В стадии распада наблюдаются затухание восходящих движений, уменьшение электрической активности и появление осадков.

Зарождение грозового облака. Зарождение и развитие грозовых облаков происходит в тропосфере, которая всегда и на всех географических широтах ионизована. Основным источником ионов в тропосфере (и в стратосфере до высот 30 – 35 км) являются галактические КЛ. На высотах до ~ 3 км воздух ионизуют также радиоактивные элементы, находящиеся на поверхности земли и в приземном слое атмосферы [3].

При ионизации в воздухе образуются равные количества положительных и отрицательных легких ионов. В связи с тем, что в приземном слое воздуха находится много аэрозольных частиц, часть легких ионов захватывается ими. В результате в воздухе присутствуют не только незаряженные, но и заряженные аэрозольные частицы или тя-

желые ионы. Измерения показывают, что концентрация аэрозольных частиц в приземном слое воздуха может достигать значений 10^5 см^{-3} и более. При этом концентрация заряженных аэрозольных частиц или тяжелых ионов одного знака порядка 10^4 см^{-3} [4]. Таким образом, большинство аэрозольных частиц воздуха являются незаряженными.

Непосредственной причиной, приводящей к образованию любых облаков, в том числе и грозовых, является конденсация содержащегося в воздухе водяного пара, в результате которой в атмосфере появляются капли. Этот процесс происходит при наличии в воздухе пересыщенного пара и так называемых ядер конденсации. Пересыщенный пар в атмосфере образуется при охлаждении влажного воздуха во время его подъема. Роль ядер конденсации выполняют смачиваемые (нежирные) аэрозольные частицы.

В восходящих потоках влажного воздуха наряду с незаряженными ядрами всегда присутствуют положительно и отрицательно заряженные ядра. На любых из них может происходить конденсация влаги. Таундсенд Дж. и Вильсон Ч. разными экспериментальными методами установили, что конденсация влаги в воздухе на отрицательно заряженных ядрах происходит при меньших пересыщениях пара, чем на положительно заряженных или нейтральных ядрах [5]. Теоретическое объяснение этого явления было дано Русановым А. И. [6]. Он показал, что в случае полярных жидкостей (а вода – полярная жидкость) коэффициент поверхностного натяжения зависит как от величины, так и от знака заряда ядра конденсации. Для отрицательно заряженных ядер величина этого коэффициента значительно меньше, чем для положительно заряженных ядер. Поэтому вероятность возникновения отрицательно заряженных зародышей капель выше, чем положительно заряженных. При пересыщениях пара порядка 1% отношение вероятностей возникновения отрицательно и положительно заряженных зародышей капель или отношение концентраций этих зародышей порядка $10^3 - 10^4$. Это означает, что в случае небольших пересыщений в атмосфере конденсационная активность отрицательно заряженных ядер на порядки выше, чем положительных, так что конденсация происходит преимущественно на отрицательно заряженных ядрах [6].

Как только в поднимающемся из приземного слоя воздухе появляется пересыщенный пар, начинается процесс образования облака – конденсация влаги и быстрый рост капель, происходящий преимущественно на отрицательно заряженных ядрах. В процессе конденсации капли растут до размеров 1–2 мкм. Далее их рост происходит преимущественно за счет коагуляции капель. Под действием сил тяготения движение капель с отрицательным зарядом вверх сильно замедляется. В свою очередь, на положительно заряженных ядрах процесс конденсации влаги замедлен (для этого требуются значительно

бóльшие пересыщения пара, которые наблюдаются на значительно бóльших высотах). Эти ядра вместе с восходящим потоком воздуха продолжают движение вверх. В результате в облаке происходит макромасштабное пространственное разделение зарядов с образованием отрицательного объемного заряда внизу и положительного – наверху.

Следует особо отметить, что процесс конденсации пара на ядрах происходит без каких-либо затрат энергии. Наоборот, в процессе конденсации пара в атмосфере выделяется энергия – скрытая теплота, равная теплоте парообразования.

Скрытая теплота, выделяющаяся при конденсации пара, способствует усилению восходящих потоков воздуха и усилению процесса разделения разноименных зарядов в зарождающемся облаке. Вместе с разделением и ростом объемных зарядов Q в облаке увеличивается напряженность электрического поля E . Это поле способствует усилению процесса коагуляции капель и тем самым усилению процесса разделения зарядов.

Стадия развития и зрелости грозового облака. На высотах расположения грозовых облаков пробивное напряжение в неионизованном облаке должно лежать в пределах $(10 - 30) \text{ кВ/см}$ [7]. В то же время известно, что при облучении воздуха (как сухого, так и влажного) высокоэнергичными частицами электрические разряды появляются при напряженностях электрического поля порядка $(2 - 3) \text{ кВ/см}$. Они проходят по ионизованным следам указанных частиц. Атмосфера непрерывно облучается космическими лучами – высокоэнергичными заряженными частицами, поэтому при появлении в грозовом облаке электрических полей с $E \approx (2 - 3) \text{ кВ/см}$ КЛ могут инициировать молниевые разряды [8 – 10].

Облако представляет собой диэлектрик, внутри которого распределены объемные заряды. Для появления внутриоблачного разряда необходимо наличие сильно разветвленного "проводящего дерева", по ветвям которого из одной части облака в другую может быть сброшен значительный объемный заряд. Появление такого "дерева" в облаке инициирует одна космическая частица сверхвысокой энергии ($\epsilon > 10^{14} \text{ эВ}$), образующая ШАЛ. Схематическая картина ШАЛ в грозовом облаке показана на рис. 1.

Продольная длина ливня может достигать 10 км и более. В поперечном направлении высокоэнергичные частицы ливня разлетаются на расстояния в сотни метров. Число высокоэнергичных частиц, рождаемых в ливне, превышает 10^5 . Ливни, рождаемые частицами с энергиями $\epsilon > 10^{15} \text{ эВ}$, достигают поверхности земли [11]. Максимум частиц ливня находится на высоте, соответствующей количеству вещества в столбе атмосферы $X_m = 500 + 75 \lg(\epsilon/10^6)$. Здесь величина X_m выражена в г/см^2 , а ϵ – в ГэВ [11]. Частота появления таких ШАЛ не зависит от времени и географической широты.

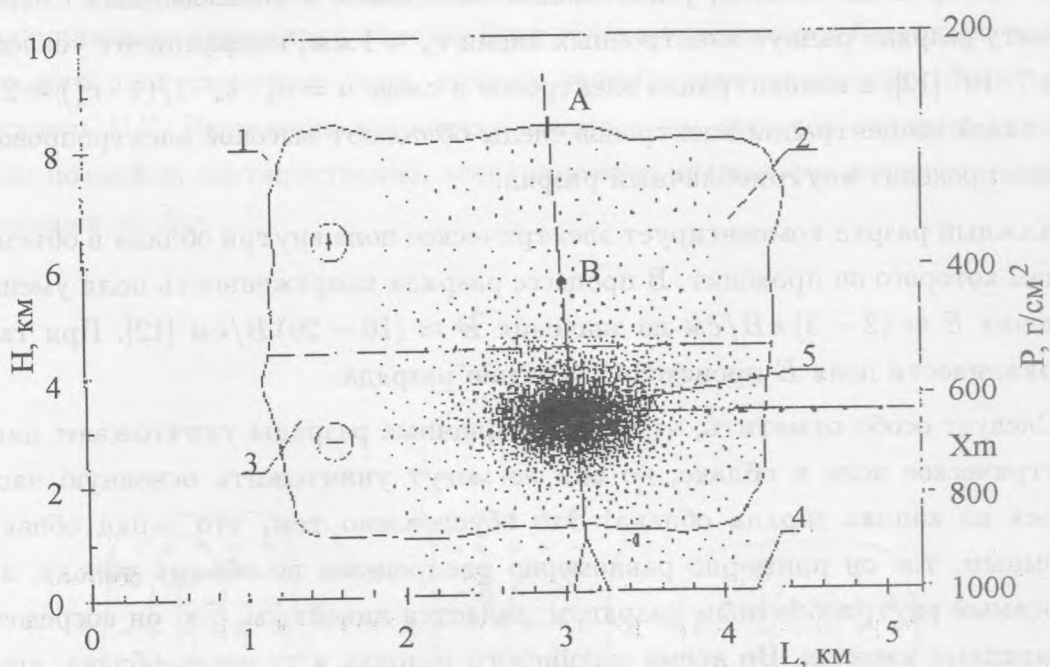


Рис. 1. Схематическая картина широкого атмосферного ливня, образуемого космической частицей сверхвысокой энергии в грозовом облаке (по Росси [11]): H – высота в атмосфере в км; L – горизонтальная протяженность облака в км; P – величина атмосферного давления в $г/см^2$; 1 – граница грозового облака; 2,3 – области расположения избыточных положительных и отрицательных электрических зарядов в облаке (пунктирная линия – граница раздела зарядов); 4 – поверхность Земли; 5 – область нахождения максимального числа частиц ливня, которые показаны точками. Эта область расположена на высоте X_m ; прямая A – трек высокоэнергичной космической частицы с $\epsilon > 10^{15}$ эВ; B – точка взаимодействия первичной частицы A с ядром атома воздуха; идущая вниз после точки B прямая изображает ствол ливня – треки высокоэнергичных вторичных частиц; большинство частиц ШАЛ соединено своими проводящими каналами с треком первичной частицы A .

Как только величина напряженности электрического поля E в облаке достигнет значений порядка $(2 - 3) кВ/см$, внутри облака появляются внутриоблачные разряды, проходящие по ионизованным следам ШАЛ (рис. 2а). Величину заряда, переносимого внутриоблачным разрядом, можно оценить следующим образом. Высокоэнергичная частица с $\epsilon > 10^{14}$ эВ образует в многочисленных ионизованных следах ШАЛ около 10^{10} свободных электронов с линейной плотностью $n_e \approx 10^2 см^{-1}$ при общей протяженности таких следов порядка $10^8 см$. Под действием внешнего поля E эти электроны обра-

зуют электронные лавины, усиливающие ионизацию в ионизованных следах ШАЛ. К моменту разряда радиус электронных лавин $r_l \approx 1$ мм, коэффициент усиления лавины $k_l \approx 7 \cdot 10^8$ [12], а концентрация электронов в следе $n = n_e \cdot k_l \cdot 1/(\pi \cdot r_l^2) \approx 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³. При такой концентрации электронов следы обладают высокой электропроводностью, и по ним проходит внутриоблачный разряд.

Каждый разряд компенсирует электрическое поле внутри облака в объеме ШАЛ, по следам которого он проходит. В процессе разряда напряженность поля уменьшается от значения $E \approx (2 - 3)$ кВ/см до значения $E \approx (10 - 20)$ В/см [12]. При такой низкой напряженности поля E происходит гашение разряда.

Следует особо отметить, что внутриоблачные разряды уничтожают лишь сильное электрическое поле в облаке, но они не могут уничтожить основную часть находящегося на каплях заряда облака. Это обусловлено тем, что заряд облака является объемным, т.е. он примерно равномерно распределен по объему облака, а заряд, переносимый внутриоблачным разрядом, является линейным, т.к. он сосредоточен лишь в разрядных каналах. Во время молниевых разрядов в ту часть облака, где находится положительный заряд, нагнетается такой же величины отрицательный заряд. Т.к. этот заряд сосредоточен в каналах молний, то его рекомбинация с объемным зарядом облака происходит в течение определенного промежутка времени после разряда.

Частота появления внутриоблачных разрядов определяется, в основном, скоростью нарастания электрического поля в облаке и практически не зависит от частоты появления ШАЛ. В облаке с основанием ~ 13 км² интенсивность ШАЛ с $\epsilon > 10^{14}$ эВ равна ~ 1300 с⁻¹ [13].

С момента появления внутриоблачных разрядов само облако начинает генерировать электрические заряды. Количество электрон-ионных пар, рождаемых в следах одного ШАЛ электронными лавинами, не менее чем $10^{12} \cdot 7 \cdot 10^8 = 7 \cdot 10^{20}$ пар ионов, а образуемые ими заряды противоположных знаков составляют величину не менее $Q \approx 7 \cdot 10^{20} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл ≈ 110 Кл каждый. Большая часть этих пар рекомбинирует в различных процессах. Оставшаяся часть, прилипая к незаряженным аэрозольным частицам, образует новые заряженные ядра конденсации противоположных знаков, которые вместе с поступающими из приземного слоя заряженными аэрозольными частицами участвуют в вышеизложенном процессе разделения зарядов. Процесс генерации зарядов внутриоблачными разрядами приводит, в основном, к увеличению частоты этих разрядов, а также к существенному увеличению находящихся в облаке объемных зарядов противоположных знаков. Благодаря внутриоблачным разрядам в облаке возрастают

концентрации заряженных ядер конденсации, и соответственно, возрастает концентрация образующихся на этих ядрах капель. Рост облака усиливается благодаря наличию в нем сильного электрического поля, которое способствует ускорению процесса коагуляции капель [14]. Выделение в процессе конденсации скрытой теплоты усиливает восходящие потоки и, соответственно, электрическую активность и водосодержание в зарождающемся облаке.

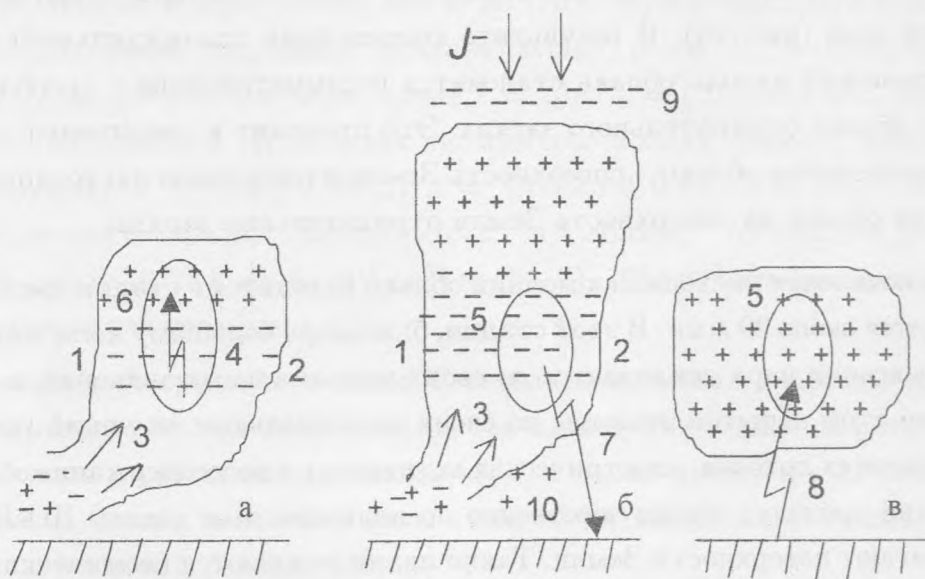


Рис. 2. Стадия зарождения (а), зрелости (б) и распада (в) грозового облака. Обозначения: 1 – область теплого фронта; 2 – область холодного фронта; 3 – восходящие потоки влажного ионизованного воздуха; 4 и 5 – области максимумов частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ), рождаемых космическими частицами с энергиями $\epsilon \geq 10^{14}$ эВ и $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ, соответственно; 6 – внутриоблачный молниевый разряд; 7, 8 – нисходящая и восходящая молнии; 9 – экранирующий слой отрицательных ионов; 10 – положительный заряд у основания облака; J^- – ток отрицательных ионов, текущий из ионосферы к вершине облака.

С течением времени образовавшийся в облаке электрический макродиполь с отрицательным объемным зарядом внизу и положительным наверху становится несимметричным по следующей причине. Под действием электрических зарядов диполя к вершине облака из атмосферы течет ток легких отрицательных ионов J^- , а к основанию облака – ток положительных ионов (рис. 2б). Кроме того, из облака вверх в атмосферу уходят положительные заряды, на которых не сконденсировался пар. Ток отрицательных ионов, текущий из ионосферы к вершине облака, более чем на порядок превышает ток

положительных ионов, текущих снизу к основанию облака. Это обусловлено тем, что подвижности и концентрации ионов у вершины облака значительно выше, чем у его основания. Как показали самолетные и аэростатные измерения [15, 16], средняя величина полного тока J , текущего над вершиной облака, порядка 1 А. Ток отрицательных ионов J^- , текущий к вершине, составляет примерно половину этой величины. Током отрицательных ионов частично компенсируется объемный положительный заряд облака. При этом у вершины образуется небольшой по толщине отрицательно заряженный экранирующий слой (рис. 2б). В результате компенсации положительного объемного заряда электрический диполь облака становится несимметричным с преобладанием в нижней части облака отрицательного заряда. Это приводит к увеличению электрического поля в промежутке облако – поверхность Земли и появлению нисходящих молний, переносящих из облака на поверхность Земли отрицательные заряды.

С момента появления нисходящих молний облако находится в стадии зрелости, которая продолжается около 20 мин. В этой стадии, благодаря большому количеству молний, скорость конденсации пара усиливается до своих максимальных значений, а благодаря выделению при этом скрытой теплоты до своих максимальных значений усиливаются скорость восходящих потоков, электрическая активность и водосодержание облака. Нисходящие молнии проходят преимущественно по ионизованным следам ШАЛ, частицы которых достигают поверхности Земли. Такие ливни рождаются космическими лучами сверхвысоких энергий с $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ. Частота появления нисходящих молний, в основном, определяется скоростью нарастания электрического поля или текущим к вершине током отрицательных ионов J^- . Она практически не зависит от скорости появления ШАЛ с $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ, которая является достаточно высокой и в облаке с основанием порядка 13 км^2 составляет около 30 с^{-1} [13].

Как правило, нисходящая молния состоит из нескольких разрядов. Первый разряд проходит по следам большого ШАЛ, рождаемого частицей с $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ. Остальные разряды проходят по неостывшему каналу первого разряда при подключении к нему проводящих каналов малых ШАЛ, рождаемых частицами с энергией $\epsilon \approx 10^{14}$ эВ. Обычно по следам таких ШАЛ проходят внутриоблачные разряды. В связи с тем, что геометрические размеры большого ШАЛ превосходят размеры малого ШАЛ, то, соответственно, и величина заряда, сбрасываемого на поверхность Земли во время первого разряда, больше, чем в последующих разрядах. При среднем радиусе ШАЛ с $\epsilon \geq 10^{14}$ эВ, равном $R_{14} \approx 200 \text{ м}$, и среднем радиусе ШАЛ с $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ, равном $R_{15} \approx 300 \text{ м}$, большинство нисходящих молний должно состоять не более чем

из $N \approx 2\pi(R_{15} + R_{14})/2R_{14} \approx 8$ разрядов. Каждый из этих разрядов будет снимать избыточный заряд из области, непосредственно охватываемой ШАЛ с $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ. Временной интервал между молниевыми разрядами в большинстве случаев должен быть не менее чем $T = 1/\{\Phi_{14} \cdot \pi[(R_{15} + 2R_{14})^2 - R_{15}^2]\} \approx 10^{-2}$ с, где $\Phi_{14} = 100 \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ – интенсивность ШАЛ с $\epsilon \geq 10^{14}$ эВ [13].

Из наблюдений известно, что каждая нисходящая молния переносит на поверхность земли отрицательный заряд величиной Q до $(10 - 20)$ Кл. Если при этом средний ток отрицательных ионов, текущих к вершине облака, равен $J^- = 0.5$ А, то нисходящие молнии должны появляться через время $t = Q/J^- = (20 - 40)$ сек, что и наблюдается в действительности [4]. Каждая нисходящая молния снимает избыточный заряд из объема облака $V = \pi(R_{15} + 2R_{14})^2 h = 3.14(0.3 + 0.4)^2 \cdot 3 \approx 5 \text{ км}^3$. Поэтому плотность избыточного заряда, находящегося в облаке, составляет $\rho = Q/(Ve) = (10 - 20) \text{ Кл}/(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \times 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^3) \approx (1 - 2) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ элементарных зарядов, что подтверждается наблюдениями [1].

Стадия распада грозового облака. С течением времени в грозовом облаке происходит непрерывный рост как незамерзших, так и замерзших капель в результате процессов конденсации и сублимации водяного пара, а также процесса коагуляции. При этом капли тяжелеют и под действием силы тяжести начинают падать вниз, что приводит к появлению осадков и распаду облака.

В процессе оседания облака вместе с осадками из его нижней части уходит объемный отрицательный заряд, а на его место сверху приходит находящийся на гидрометеорах положительный заряд (рис. 2в). В результате между облаком и землей изменяется направление электрического поля [4]. Это приводит к появлению восходящих молний, которые переносят отрицательный заряд с поверхности Земли в облако. Как и нисходящие молнии они проходят по ионизованным следам ШАЛ, образуемым частицами с энергиями $\epsilon \geq 10^{15}$ эВ.

При выпадении осадков восходящие потоки влажного воздуха в облаке сильно ослабевают, а вместе с этим ослабевают и процессы генерации и разделения новых электрических зарядов. По этой причине восходящие молнии ликвидируют главным образом часть того положительного объемного заряда, который ранее образовался в верхней части облака. Оставшаяся в облаке часть заряда выпадает на поверхность земли вместе с осадками или рассеивается в атмосфере. В связи с тем, что положительный электрический заряд, находящийся в верхней части облака, невелик, то количество восходящих молний, образуемых в грозовом облаке, во много раз меньше, чем нисходящих. Как

известно из наблюдений [17] они составляют $\sim 10\%$ от общего числа разрядов между облаком и Землей.

Красные спрайты и голубые струи. При прохождении молниевых разрядов по ионизованным следам ШАЛ наблюдается свечение этих следов. В случае внутриоблачных и нисходящих молний это свечение в основной своей массе закрыто от находящегося над облаком наблюдателя. Однако при оседании облака и появлении восходящих молний верхняя часть светящегося ШАЛ может быть открыта для наблюдателя. Известно много случаев таких наблюдений, проведенных на самолетах и космических аппаратах [18, 19]. Указанные свечения наблюдаются, когда вершина облака находится на высоте (5 – 10) км.

Электрическое поле над положительно заряженным грозовым облаком (стадия распада облака, рис. 2в) создается диполем, образованным положительным зарядом самого облака и отрицательным "изображением" этого заряда, которое находится под электропроводящей поверхностью Земли на глубине, равной высоте облака. Во время восходящей молнии часть положительного заряда облака "стекает" в проводящий поверхностный слой Земли. На эту же величину уменьшаются заряды облака и его "изображения". Время релаксации заряда, поступившего в поверхностный слой Земли, является конечным. Как следует из измерений напряженности электрического поля под грозовыми облаками, это время лежит в пределах от единиц до сотни мсек при среднем значении порядка 20 мсек [20].

С момента появления восходящей молнии электрическое поле над облаком можно рассматривать как сумму полей симметричного диполя, создаваемого оставшимся в облаке положительным зарядом и его отрицательным "изображением", и поля от появившегося в поверхностном слое Земли положительного заряда. На больших высотах (в ионосфере) электрическое поле от положительного заряда является определяющим, потому что оно уменьшается с высотой как h^{-2} , в то время как поле от диполя уменьшается как h^{-3} .

Из наблюдений известно, что восходящая молния может перенести из облака на поверхность Земли положительный заряд порядка 50 Кл. Такой заряд создает над облаком на высотах 22.5, 45 и 90 км (высоты выбраны для удобства расчетов) напряженности электрического поля E , равные $\sim 9, 2.2$ и 0.55 В/см, и электрические потенциалы ϕ , равные 20, 10 и 5 МВ.

Под действием электрического поля E , образуемого этим зарядом, из ионосферы к вершине облака движутся свободные электроны. При движении они накапливаются

энергию, а затем при столкновениях с молекулами (атомами) воздуха возбуждают или ионизуют их. Расчеты показывают, что на ионосферных высотах электроны между столкновениями с молекулами воздуха приобретают энергию, достаточную для возбуждения колебательных уровней молекул азота. При дезактивации этих возбужденных молекул излучаются фотоны преимущественно красного цвета. Это излучение, наблюдаемое в ионосфере во время гроз, получило название красных спрайтов [21].

Часть движущихся из ионосферы электронов может иметь минимальное число столкновений с молекулами (атомами) окружающего воздуха и проходить большие расстояния вплоть до верхней границы облака и при этом приобретать достаточно большую энергию. Такие электроны при столкновениях образуют фотоны всего видимого диапазона длин волн и коротковолновое излучение – вплоть до γ -квантов с энергиями в единицы $MэВ$. При этом в наблюдаемой светящейся струе между ионосферой и вершиной облака рассеянный свет обогащен коротковолновыми фотонами (в соответствии с законом Релея интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны). Этим объясняется голубой свет светящихся струй, наблюдаемых над грозовыми облаками [21].

В работе изложен механизм, объясняющий происхождение и основные электрические параметры грозовых облаков и молниевых разрядов. От других известных механизмов он отличается следующим. Необходимые для зарождения грозового облака разноименные заряды образуются космическими лучами и радиоактивными элементами, находящимися в воздухе и почве. В стадии зрелости и распада грозового облака основным генератором разноименных зарядов, необходимых для образования сильного электрического поля в облаке и молний, являются сами молнии, в сильно разветвленных и сильно ионизованных следах которых образуются огромные количества разноименных ионов. Молниевые разряды в облаках инициируются широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), образуемыми космическими лучами сверхвысоких энергий ($\epsilon > 10^{14}$ эВ).

В соответствии с изложенным механизмом молнии непрерывно подзаряжают Землю отрицательным электричеством. Грозовая активность в разных точках земной поверхности зависит от наличия радиоактивных элементов в почве и воздухе, от потока космических лучей и уровня активности Солнца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ (тема "Влияние вариаций гелиокосмических излучений на процессы в атмосфере").

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мейсон Д. Физика облаков, пер. с англ., Л., Гидрометеиздат, 1961.
- [2] Юман М. Молния, пер. с англ., М., Мир, 1972.
- [3] Martell E. A. Enhanced ion production in convective storms by transpired radon isotopes and their decay products, *Journal of Geophysical Research*, **90**, D4, 5909 (1985).
- [4] Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество, пер. с англ. Л., Гидрометеиздат, 1974.
- [5] Милликен Р. Электроны (+ и -), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи, пер. с англ., М.-Л., ГОНТИ, 1939.
- [6] Русанов А. И. ДАН СССР, **238**, N 4, 831 (1978).
- [7] Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах, пер. с англ., М., Изд-во иностранной литературы, 1960.
- [8] Ermakov V. I. Lightning initiation by galaxy cosmic rays, *Proceedings of 9th International Conference on Atmospheric Electricity, St-Petersburg*, **2**, 485 (1992). Main Geophysical Observatory St-Petersburg, 1992.
- [9] Ermakov V. I. and Stozhkov Y. I. New mechanism of thundercloud and lightning production. *Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Alabama, USA*, 242 (1999).
- [10] Roussel-Dupre R. and Gurevich A. V., *J. Geophys. Res.*, **101**, N A2, 2297 (1996).
- [11] Мурзин В. С. Физика космических лучей, М., МГУ, 1970.
- [12] Райзер Ю. П. Физика газового разряда, М., Наука, 1987.
- [13] Амагуни А. Ц. и др. Проект АНИ и перспектива экспериментального изучения взаимодействий частиц сверхвысокой энергии, в кн.: *Проблемы физики космических лучей*, М., Наука, 1987.
- [14] Reiter R. *Phenomena in atmospheric and environmental electricity*. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [15] Gish O. H. and Wait G. R. *Journal of Geophysical Research*, **55**, N 4, 473 (1950).
- [16] Stergis C. G., Rein G. C., and Kangas T. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **11**, 83 (1957).
- [17] Uman M. A. *Proceedings of the IEEE*, **76**, N 12, 5 (1988).
- [18] Vaughan O. H., Jr., and Vonnegut B. *Journal of Geophysical Research*, **94**,

- N D11, 13179 (1989).
- [19] R o d g e r C. J. Rev. Geophysics, **37**, N 3, 317 (1999).
- [20] B e a s l e y W., U m a n M. A., and R u s t e n P. L. Jr. Journal of Geophysical Research, **87**, N C7, 4883 (1982).
- [21] S e n t m a n D. D., and W e s c o t t E. M. EOS, **77**, N 1, 284 (1982).

Поступила в редакцию 18 февраля 2003 г.