

кристаллов. Более того, каждый из этих механизмов следует рассматривать как гипотезу, поскольку отсутствуют надежные оценки и экспериментальные данные о вкладе различных процессов в заряд облаков.

4 Электрическое поле и условия возникновения молний в грозовых облаках

Несмотря на большое число гипотез формирования электрического поля и схем строения грозовых облаков, общепринятого взгляда на эту сложную проблему не существует и до настоящего времени. Наибольшим признанием пользуется схема строения грозового облака, первоначально предложенная Симпсоном и Робинсоном (1941 г.), а затем уточнявшаяся Байерсом, Брейамом, Пирсом и др. В последние десятилетия широкие экспериментальные исследования грозовых облаков с помощью самолетов и локационной техники проведены в Советском Союзе.

Одна из схем электрической структуры грозового облака, обобщающая многолетние экспериментальные исследования, изображена на рис. 23.4. Согласно этой схеме, в верхней части облака (чаще всего располагающейся выше изотермы -12°C) преобладают положительные заряды, преимущественно на ледяных частицах. В нижней части облака сосредоточены в основном отрицательные заряды.

Такое распределение объемных зарядов первого (крупного) масштаба обусловлено влиянием различных процессов электризации, при этом ни один из них нельзя считать главным и тем более единственным в формировании электрического поля грозового облака. В облаке одновременно наблюдаются процессы, способствующие и препятствующие накоплению зарядов на облачных частицах (каплях и кристаллах) и пространственному разделению значительных объемов разноименно заряженных частиц.

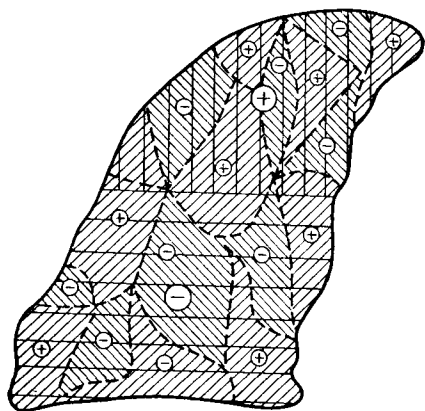


Рис. 23.4. Схема распределения электрических зарядов в развивающемся грозовом облаке.

Вертикальной и горизонтальной (редкой) штриховкой обозначены области, создающие основное электрическое поле E_0 ; косой (частой) штриховкой — области положительных и отрицательных зарядов меньшего масштаба, увеличивающие напряженность до $E_{кр}$.

Определяющая роль в формировании электрического поля конвективных облаков принадлежит вертикальным движениям и турбулентному обмену.

Под влиянием вертикальных движений происходит разделение зарядов в облаке с преобладанием положительных в верхней части и отрицательных в нижней (рис. 23.4). Эти заряды (первого масштаба) формируют электрическое поле, напряженность которого может достигать значений порядка 10^5 В/м.

Более высокие значения напряженности (порядка 10^6 В/м), необходимые для возникновения молний, создаются под влиянием турбулентных движений. Роль турбулентности двоякая. С одной стороны, если усиливается мелкомасштабная турбулентность, то увеличивается ток проводимости и, как следствие, уменьшается напряженность электрического поля первого масштаба (по облаку в целом). С другой стороны, достаточно крупные турбулентные объемы, отрываясь от общего потока и сближаясь со столь же крупными объемами, содержащими заряды противоположного знака, увеличивают напряженность поля. Порождаемые такой макротурбулентностью неоднородности электрического поля (явление меньшего масштаба) способны повысить напряженность поля до таких критических значений (порядка 10^6 В/м), когда начинаются разряды внутри облака, разряды между соседними облаками и разряды на землю, т. е. процесс *молниеобразования*.

В самой нижней части облака преобладают объемы (второго масштаба) с избытком положительных зарядов (см. рис. 23.4), чему способствует перенос положительных ионов почвенного происхождения конвективными потоками, а также испарение и разбрызгивание крупных капель под облаком. Именно между нижней (положительно заряженной) и средней (отрицательно заряженной) частями облака наиболее часто напряженность поля достигает значений, называемых *пробойными*, при которых происходит искровой пробой слоя воздуха. Сила тока при искровом разряде резко возрастает за счет ионизации воздуха по всему каналу разряда. Такой разряд называют самостоятельным, поскольку сила тока в нем (в отличие от тока проводимости) не зависит от начальной концентрации ионов в атмосфере. Значение пробойной напряженности ($E_{пр}$) сильно зависит от того, насколько однородна земная поверхность под облаком (с увеличением неоднородности $E_{пр}$ уменьшается).

На первой стадии искровой разряд состоит из большого числа отдельных разрядов — «сети проводящих нитей» (стриммеров). Разряд на землю начинается с объединения нескольких стриммеров в ступенчатый лидер, который прокладывает сильно ионизированный канал на пути от облака к земле. Когда ступенчатый лидер достигает земли, возникает возвратный удар (импульс), для которого характерен перенос положительного заряда вверх по ионизированному каналу. По мере усиления лидера происходит

распространение проводящей сети на более высокие уровни, при этом первоначальный положительный заряд исчезает, однако выше появляется новый и т. д. Образованная таким образом проводящая сеть будет располагаться выше прежней, превращая еще одну часть столба в проводник и вызывая следующий удар. Процесс продолжается до тех пор, пока стримеры не выкачают из облака весь его отрицательный заряд.

Кучево-дождевое облако, в котором сформировалась двухзарядная электрическая структура (дополненная очагами положительных зарядов в нижней части облака), представляет собой грозовую ячейку, порождающую разряд (молнию) на землю. Как правило, развитое кучево-дождевое облако включает несколько таких ячеек, находящихся на различных стадиях развития. Полное время жизни ячейки составляет 20—30 мин.

Под влиянием переноса положительных зарядов от земной поверхности к облакам (не только грозовым, но и других форм) земля получает отрицательный заряд. Согласно гипотезе Я. И. Френкеля, такой перенос зарядов является основным механизмом, вследствие которого земля оказывается в среднем заряженной отрицательно.

Виды молний. Наблюдаемые в атмосфере искровые разряды (молнии) принято делить на линейные (с подразделением на разветвленные, ленточные и ракетообразные), плоские, шаровые и четочные.

Средняя длина наиболее часто встречающихся *линейных молний* при разряде на землю составляет несколько километров, диаметр канала 15—20 см, сила тока изменяется в широких пределах (максимальные значения достигают нескольких килоампер), общее количество электричества за один разряд — 20—30 Кл, длительность молнии в среднем около 0,2 с (максимальные значения — около 1,5 с), мощность молнии — миллионы киловатт, энергия же разряда сравнительно невелика (энергии одной грозы хватает для питания в течение 1 ч лишь одной лампочки в 150 Вт). Температура разрядного канала повышается (практически мгновенно) до 15 000—20 000 К. Взрывы гремучего газа (образовавшегося в результате разложения воды) и повышение давления (под влиянием роста температуры) в канале сопровождаются образованием ударных волн, которые воспринимаются как *гром*. Частота колебаний грома около 20 Гц, а скорость распространения (за исключением первых мгновений после возникновения) практически совпадает со скоростью звуковой волны

$$v = 20,1 \sqrt{T_v},$$

где v — в м/с, $T_v = T(1 + 0,275e/p)$ — так называемая виртуальная акустическая температура; при $T_v = 273$ К значение $v = 331,8$ м/с.

Радиус области слышимости грома сравнительно невелик — 15—20 км. Поскольку звуковая волна приходит от разных частей

канала и его разветвлений, а также отражается от облаков, гор, фронтальных разделов и др., то возникает явление раскатов грома.

Остановимся несколько подробнее на механизме развития линейной молнии. В атмосфере преобладают разряды между отрицательно заряженной нижней частью облака и положительно заряженной (наведенным электричеством) земной поверхностью. По достижении пробойных значений напряженности от облака к земле развивается лидер, представляющий собой поток электронов, вызывающих ударную (лавинообразную) ионизацию воздуха. Собственное излучение головки лидера (имеющей температуру свыше 20 000 К) порождает фотоионизацию возбужденных газовых частиц. Фотоны обгоняют головку лидера, способствуя образованию впереди него коронных разрядов. Вследствие этого ступенчатый лидер движется с большой скоростью (около 150 км/с) отдельными толчками по извилистому пути. Длительность импульсов и пауз — 50—100 мкс, длина ступенек — около 50 м. После достижения одним из ответвлений лидера земной поверхности по образованному им каналу высокой проводимости происходит формирование основного канала молнии. При этом видимый канал нарастает снизу вверх. Такую фазу разряда называют возвратным ударом, в течение которой ток в канале быстро нарастает до максимальных значений (сотни килоампер), канал разогревается и светится особенно сильно, возникает гром.

Все последующие импульсы тока (а их при грозовом разряде 3—5) распространяются по каналам, подготовленным лидерами. Однако движение новых лидеров по старому каналу гораздо легче, чем первого (им достаточно восполнить потери проводимости за счет рекомбинации ионов). По этой причине все последующие лидеры (называемые стреловидными) движутся со скоростью, близкой к скорости импульса (в то время как скорость первого лидера примерно в 100 раз меньше скорости импульса тока, равной 10^4 — 10^5 км/с). Импульсы тока нейтрализуют не только отрицательный заряд лидера, но распространяются на все большую толщину облака, истощая его электрический заряд.

Если перерыв между импульсами (в среднем равный 0,03 с) оказывается слишком длительным (около 0,1 с), то лидер последующего разряда приобретает ступенчатый характер и движется с меньшей скоростью. Отмечаются случаи развития ступенчатых (положительных) лидеров от заостренных предметов на земле к облаку.

Плоская молния представляет собой суммарный эффект большого числа коронных разрядов на облачных элементах (подобных свечению газа вблизи положительного электрода), вызывающих красноватое бесшумное свечение значительной толщи грозового облака.

К числу наиболее загадочных и малоизученных явлений природы относятся *шаровые молнии*. Диаметр их у земной поверхно-

сти — 10—15 см, длительность существования — от долей секунды до нескольких минут, скорость движения (часто вдоль хорошо проводящих предметов) — несколько метров в секунду, цвет — белый или красноватый. При движении шаровая молния издает жужжащий или шипящий звук, исчезновение сопровождается или слабым треском, либо сильным взрывом и снопом искр (приводящим к разрушениям).

О природе шаровых молний высказаны лишь гипотезы. По гипотезе Я. И. Френкеля, шаровая молния — это шарообразный вихрь смеси частиц пыли и дыма с химически активными газами. Вихрь-шар в целом электрически нейтрален и способен на длительное независимое существование. Способность шаровой молнии обходить препятствия объясняется эффектом, наблюдаемым при движении шаровых колец. Взрыв шаровой молнии — следствие существования верхнего и нижнего пределов концентрации различных веществ, при которых они реагируют друг с другом или перестают реагировать. Химическая реакция, идущая как цепной процесс с огромной скоростью, — это и есть взрыв шаровой молнии.

Однако гипотезе Френкеля присущ существенный недостаток — она не учитывает и не объясняет происхождения энергии шаровой молнии. По оценке П. Л. Капицы, внутренней энергии шаровой молнии совершенно недостаточно для производимого ею эффекта. Источником энергии шаровой молнии, по Капице, служит энергия радиоизлучений в метровом и дециметровом диапазонах, возникающих (наряду с другими электромагнитными волнами) при атмосферных разрядах. Возникает шаровая молния под влиянием мощного колебательного процесса в электрическом поле облака или вблизи земной поверхности. Существенным доводом в пользу радиоволновой природы шаровой молнии служит характер ее движения — способность проникать в помещения через дымоходы, щели, иногда по проводам, неожиданно появляться из телеграфных и телефонных аппаратов и даже в герметизированных реактивных самолетах. Взрыв молнии происходит при внезапном прекращении подвода энергии — возникает явление, известное под названием схлопывания сферы разреженного ионизированного воздуха.

Четочные молнии — несколько десятков образований шарообразной формы, располагающихся вдоль канала линейной молнии; расстояние между ними около 1 м, диаметр — несколько сантиметров, время существования не превышает 1 с.

5 Статистические характеристики гроз

5.1. Грозовые облака. Выполненные в последние годы исследования позволили установить такие значения параметров конвективного облака, которые характерны для различных стадий его раз-