

ОЦЕНКИ ЗАРЯДА КАПЕЛЬ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

Г.С. Павлов

ESTIMATIONS OF A CHARGE OF DROPS IN STORM CLOUDS

G.S. Pavlov

Одним из направлений изучения физики атмосферных облаков являются процессы образования атмосферного электричества, яркими проявлениями которых являются грозы. Важным элементом этих процессов является конденсация влажного воздуха, образование капель на инородных телах, их коагуляция и выпадение под действием силы тяжести. В работах Стожкова и Ермакова [1, 2] обосновывается механизм разделения зарядов, в основе которого лежит механизм Русанова [3], обеспечивающий преимущественное образование капель на отрицательных ионах. Сами эти ионы образуются частицами внеземного происхождения – космическими лучами. Целью этой работы является определение диапазона значений, в котором может находиться заряд одной капли.

Происхождение и свойства атмосферного электричества в целом связаны с микрофизикой и макрофизикой. Электрические поля, существующие в природе и лаборатории, могут иметь разную природу.

Природные условия отличаются от лабораторных тем, что электрическая поляризация в первом случае имеет преимущественно макроскопический характер, она связана с удалением зарядов противоположного знака на значительные расстояния друг от друга, в то время как во втором случае эти расстояния имеют сплошь и рядом молекулярные размеры.

Если частицы вещества, с которыми связаны положительные заряды, существенно отличны по своим размерам и массе от частиц с отрицательными зарядами, то под влиянием силы тяжести эти частицы отделяются друг от друга на значительные расстояния. При этом возникает макрополяризация образуемого ими облака и образуется электрическое поле значительной величины.

Переходя к вопросу о механизме микроразделения электрических зарядов, удовлетворяющем выше указанному, мы должны различать два механизма, которые представляются одинаково приемлемыми, а именно: во-первых, механизм, в соответствии с которым в перенасыщенном воздухе, освобожденном от пылевых ядер, конденсация происходит на ионных центрах. Вильсон [4] попытался проделать эксперимент, в котором он, ионизируя воздух в своей камере путем очень непродолжительного рентгеновского облучения и применяя электрические поля соответствующей полярности, смог обеспечить избыток ионов того или иного знака.

Второй механизм предполагает, что конденсация происходит на ядрах: на частицах пыли, дыма и т.д. Наиболее часто встречающиеся размеры этих частиц соответствуют радиусу $2.5 \cdot 10^{-5}$ см. Частицы радиусом больше 20 мкм будут оставаться в воздухе во взвешенном состоянии лишь очень короткое время, так как они обладают скоростями падения порядка 5 см/с.

Опыты показывают, что около земной поверхности существует сильное электрическое поле, которое в присутствии облаков имеет напряженность около 3 кВ/см и колеблется возле этих значений. Однако для простоты это значение мы считаем постоянной величиной.

Постановка задачи и основы приближения

Пусть Земля имеет отрицательный заряд и окружена оболочкой, заряженной положительно. В атмосфере находится капля радиусом r . Определим число избыточных электронов в данной капле, если она висит в атмосфере под действием внешних сил. Напряженность электрического поля $E = 3$ кВ/см. Заряд капли является кратным одной и той же величине e_0 – элементарному заряду. Размеры капель $r = 5 \cdot 10^{-4}$ см. При плотности воды $\rho = 1$ г/см³, ускорении силы тяжести $g = 10^3$ см/с² на частицу действует сила тяжести $F_g = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho g$.

Капелька будет находиться в равновесии, когда сила тяжести, приложенная к ней со стороны Земли, будет уравновешена кулоновской силой $F_q = Eq$, где $q = e_0 N$ – заряд тела, N – число зарядов.

Подстановка численных значений дает $N = 100$. При таком количестве избыточных электронов капля зависает в воздухе и гравитационное разделение зарядов перестает действовать. Поэтому указанное значение является максимальным.

Минимальное значение N мы можем найти, если оценить радиус облака, дающий нужное электрическое поле. Будем рассматривать сферическое облако, создаваемое объемными зарядами, состоящими из шарообразных капель. Здесь и далее будем считать, что капли жестко закреплены между собой и распределены равномерно. В центре каждой капли помещен электрон. Для упрощения оценок облако будем считать изолированным – положительные заряды удалим на бесконечность. Один избыточный электрон в каждой капле – результат предположения, что капля росла в электрически нейтральной среде, и коагуляции не происходило.

Напряженность электрического поля в облаке обладает интересной особенностью, она возрастает при увеличении расстояния от центра тяжести облака и достигает максимального значения на краю облака. Найдем радиус облака, если максимальное напряжение $E = 3$ кВ/см. Общий заряд грозовых облаков найдем, если возьмем плотность водности 2.5 г/м³, в каждой капле по одному электрону и радиус капли $r = 5$ мкм.

Чтобы найти плотность заряда, плотность водности делим на массу капли $5 \cdot 10^{-10}$ г, тем самым находим число электронов в единице объема $n_0 = 5 \cdot 10^3$ см⁻³ и, умножая на заряд электрона,

имеем $n_0 e_0 = 2.4 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSE/см³. Поле внутри шара меняется как $E = \frac{4}{3} \pi n_0 e_0 R$. Преобразуя это уравнение, находим радиус облака:

$$R = \frac{E}{\frac{4}{3} \pi n_0 e_0} = 10^6 \text{ см.}$$

Этот размер примерно на порядок больше, чем центральная часть (с указанной выше водностью) реальных грозовых облаков. Чтобы прийти к реальному размеру, необходимо допустить, что избыточный заряд капли $N \cong 10$ или больше. Это указывает на заметную роль коагуляции капель в процессе роста. Для достижения максимального размера капля должна поглотить не менее 10 зародышей с единичными зарядами.

Таким образом, избыточный заряд капли должен находиться в пределах $10 < N < 100$.

Причиной образования водяных масс в атмосфере является насыщенный водяным паром воздух. Водяные капли образуются на ионах, причем на отрицательных ионах эффективнее, чем на положительных. Попытаемся прояснить этот момент.

Молекулы воды представляют собой электрический диполь. Масса молекулы связана с положительными зарядами, поэтому ее центр тяжести смещен к положительному концу диполя.

Положительный, более массивный, конец диполя будет стремиться ориентироваться по направлению движения молекулы. Отрицательно заряженные капли притягивают молекулы, летящие по направлению к ним, и ускоряют их движение. Для положительно заряженных капель будет наблюдаться торможение молекул.

Таким образом, рост отрицательно заряженных капель будет ускорен за счет предлагаемого механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозовых облаков / Препринт 2. ФИАН, 2004. 38 с.
2. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Космические лучи в механизме образования грозовых облаков // Краткие сообщения по физике / ФИАН. 2003. № 1. С. 23–35.
3. Русанов А.И. К термодинамике нуклеации на заряженных центрах // ДАН СССР. 1978. Т. 238, № 4. С. 831–834.
4. Мейсон Б.Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. С. 44–45.

*Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера, Якутск*