

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ И ТРОПИЧЕСКИХ УРАГАНАХ

А.В. Карелин

(Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН)

Предложен и численно проанализирован механизм генерации электрических зарядов в грозовых облаках на основе коронного разряда на каплях воды (КРК) с малым содержанием солей. Показано, что указанный механизм, наряду с другими механизмами, может играть существенную роль не только в локальных грозах, но и в развитии и поддержании тропических ураганов и циклонов.

Ключевые слова: грозовые облака, генерация зарядов, коронный разряд, тропический циклон, молния.

Введение

Среди всех видов электрических зарядов и полей, наблюдаемых в атмосфере, заряды и поля, порождаемые облаками вообще и кучево-дождевыми (грозовыми) в особенности, достигают наиболее внушительных значений и, следовательно, представляют наибольший научный и особенно прикладной интерес [1].

До последнего времени все попытки создания теории образования зарядов облаков и осадков скорее носили характер гипотез, чем теорий, и далеко не полно объясняли различные стороны этого сложного явления [1].

Относительно недавно была предложена и численно проанализирована в одномерном приближении система уравнений квазигидродинамики для электрического поля, зарядов и концентрации облачных частиц и легких аэроионов воздуха в стратифицированной области мезомасштабных конвективных систем [2]. В рамках предложенной системы уравнений рассмотрена электризация тающих гидрометеоров вблизи нулевой изотермы. В численной модели анализировались два варианта – индукционный и безындукционный механизмы зарядки при таянии падающих гидрометеоров.

Физика упомянутых механизмов состоит в следующем. Рассмотрим поток тающих гидрометеоров с постоянной концентрацией. При прохождении области таяния, лежащей в окрестности нулевой изотермы, от гидрометеоров отрываются и сносятся встречным по отношению к гидрометеору потоком воздуха мелкие капли воды, уносящие электрический заряд. Область таяния определяется функцией таяния $f(z)$, которая параметризует интенсивность процесса разделения зарядов в зависимости от высоты в окрестности от нулевой изотермы. При приближении ледяной частицы к нуле-

вой изотерме на ней начинается формирование тонкого слоя воды, который начинает уносить заряд с тающего гидрометеора [2].

Величина разделяемого заряда для индукционного и безындукционного механизмов задается по-разному [2]. Для индукционного механизма величина заряда, отрывающегося в единицу времени, пропорциональна не только концентрации тающих гидрометеоров N_Q , частоте отрыва капель ν и функции таяния $f(z)$, но и напряженности электрического поля E

$$R(z) = \begin{cases} \Delta q_0 \nu N_Q f(z), & \text{безындукционный механизм;} \\ \alpha \nu N_Q E f(z), & \text{индукционный механизм.} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент поляризации тающих гидрометеоров; Δq_0 – максимальный заряд, отрывающийся в единичном акте электризации.

Характерное значение скорости безындукционной зарядки R_1 , полученное в работе [2] на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, составляет $6 \cdot 10^{-11}$ Кл/(м³·с).

Характерные значения параметров в формуле (1), а также вклад индукционного и безындукционного механизмов оценивались на основании сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными [3]. При выбранных для расчетов параметрах существенных отличий во временной динамике поля между результатами, полученными при индукционном и безындукционном механизмах образования зарядов, не выявлено. Однако, по мнению авторов [2], существенным преимуществом индукционного механизма таяния является то, что физические процессы, ведущие к разделению зарядов, здесь хорошо понятны.

Содержание анионов и катионов в дождевой воде

Дата (1993 г.)	Cl, мг-экв/л	NO ₃ , мг-экв/л	SO ₄ , мг-экв/л	Na, мг-экв/л	NH ₄ , мг-экв/л	Минерализация, мг/л	pH
9.09 – 10.09	0,03	0,02	0,02	0,15	0,038	8,4	6,51
11.09	0,006	0,015	0,016	0,14	0,034	6,5	6,12
12.09 – 13.09	0,01	0,03	0,02	0,23	0,046	10,3	5,97
13.09 – 14.09	0,01	0,01	0,01	0,1	0,02	4,6	6,21
21.09 – 22.09	0,02	0,035	0,05	0,14	0,08	16,9	6,01
Среднее	0,013	0,028	0,032	0,15	0,044	9,3 – 9,5	6,16

С нашей точки зрения, приведенный в работе [2] подход является достаточно обоснованным, а результаты могли бы быть достаточно убедительными, если бы при рассмотрении учитывались все возможные механизмы генерации электрических зарядов и были бы приведены характерные значения параметров в формуле (1). К сожалению, в работе [2] последние отсутствуют. Поэтому, для полноты картины, целью настоящей работы является оценка роли еще одного механизма генерации зарядов в грозовых облаках – коронного разряда на каплях воды (КРК) в области нулевой изотермы.

КРК-механизм генерации электрических зарядов

В качестве ключевого параметра о возможной роли КРК используем экспериментальные данные о том, что средние плотности электрического заряда \bar{Q} в грозовых облаках обычно не превышают нескольких нКл/м³ [2, 4, 5].

В основу нашей теории мы положим экспериментальные данные анализа дождевой воды (см. таблицу) по материалам сайта «Аналитическая химия», приведенным В. Ковалевым. Образцы дождей отбирались за 40 км к югу от г. Новосибирска.

Физический смысл механизма КРК сводится к следующему. Если в каплях воды содержится некоторое количество анионов и катионов, то под действием внешнего электрического поля

капли вытягиваются, превращаясь в эллипсоид, и на их противоположных концах скапливаются положительные и отрицательные ионы. Из-за разделения зарядов возле положительного конца капли возникает сильное электрическое поле, которое ускоряет и размножает электроны, возникающие под действием жесткого космического излучения. Так происходит коронный разряд на положительном конце капли. Значительная часть вторичных электронов прилипает к тяжелым частицам в плазмохимических реакциях. Затем положительные и отрицательные ионы могут прилипнуть к каплям воды или исчезнуть в реакциях ион-ионной рекомбинации. Таким образом может происходить генерация зарядов в грозовых облаках.

Согласно опытным данным [1] в распределении капель по размеру наблюдается максимум в области 5 – 8 мкм. В качестве функций распределения используют логарифмически нормальное и гамма-распределения. Общее число капель в основной части спектра (от 1 мкм до нескольких десятков мкм) колеблется от десятков до тысяч в 1 см³. При этом спад в сторону малых размеров происходит быстрее, чем в сторону более крупных капель. Для дальнейших оценок будем рассматривать нейтральные капли с начальным радиусом $R_k = 20$ мкм, концентрацией $n = 0,1$ см⁻³ и содержанием анионов натрия $m_{Na} = 0,15$ мг-экв/л. Объем капли

$$V_k = 4 / 3\pi R_k^3 = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-3} .$$

Величина положительного суммарного заряда анионов капли $Q_k = 2,1 \cdot 10^{-8}$ Кл. Аналогичной будет также и величина отрицательного заряда катионов в капле.

Под действием внешнего электрического поля E капля вытягивается в эллипсоид радиусом (он же соответствует радиусу кривизны конца капли)

$$r_k = \sqrt{3V_k / 2\pi l_k}, \quad (2)$$

где l_k – длина эллипсоида, которая может быть вычислена на основе уравнения

$$L\gamma_k - 2\pi R_k \gamma_k = Q_k E. \quad (3)$$

Здесь $\gamma_k = 78,33 \cdot 10^{-3}$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды [6] и

$$L = \pi \left[1,5 \left(\frac{l_k}{2} + \sqrt{\frac{4V_k}{2\pi l_k}} \right) - \sqrt{\frac{l_k}{2} \sqrt{\frac{4V_k}{2\pi l_k}}} \right].$$

Решать уравнение (3) достаточно сложно, но его можно упростить с учетом сильного растяжения капли ($R_k \ll l_k$) и получить решение в виде

$$l_k = \frac{2Q_k E + 4\pi R_k \gamma_k}{1,5\pi \gamma_k}. \quad (4)$$

Формула (4) выполняется с хорошей точностью при величине внешнего электрического поля $E > 2$ кВ/м. Следует отметить, что такие поля (и даже большие) достаточно легко получить в туманах и облаках при фоновой скорости ионизации $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ посредством диффузионно-дрейфового механизма зарядки капель и пространственного разделения зарядов [7, 8].

Электрическое поле капли складывается как сумма полей от зарядов анионов и катионов

$$E_k(r) = \frac{Q_k}{4\pi \epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l_k + r} \right), \quad (5)$$

где $\epsilon_0 = 8,842 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $\epsilon = 1$ – диэлектрическая проницаемость воздуха.

В постоянном поле электронная лавина, вызванная первичным электроном, развивается не только во времени, но и в пространстве вдоль направления дрейфа рождающихся электронов, потому что все они движутся с одной скоростью v_d вдоль поля. Поэтому в физике газового разряда целесообразно характеризовать скорость ионизации не частотой ионизации ν_i , а ионизационным коэффициентом Таунсенда α_i – числом ионизаций, совершаемых электроном на пути в 1 см [9]. Очевидно,

$$\nu_i = \alpha_i v_d. \quad (6)$$

Следует подчеркнуть, что первичной и всеобъемлющей характеристикой скорости ионизации является все-таки не α_i , а частота ν_i . Именно она, как и скорость дрейфа, вычисляется при помощи функции распределения. Ионизационный коэффициент – величина производная. Она выводится по формуле (6). В быстропеременных полях α_i вообще особого смысла не имеет. Но с другой стороны, в опытах с постоянным полем непосредственно измеряют не ν_i , а именно α_i .

Скорость дрейфа оценивается по формуле

$$v_d = \mu_e E, \quad (7)$$

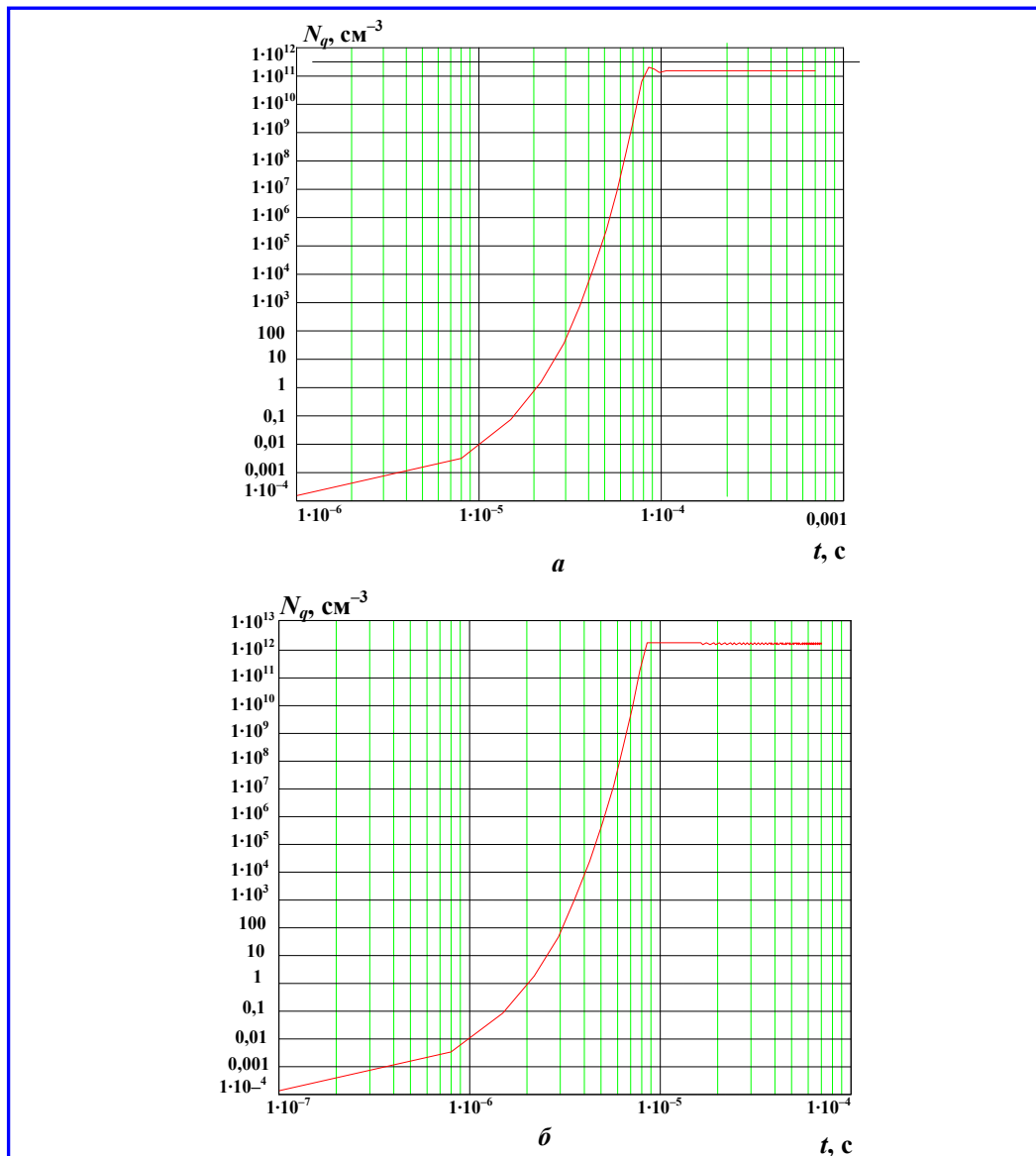
где μ_e – подвижность электронов в воздухе.

Поскольку средняя энергия электронов зависит от поля, зависимость v_d от E не является строго линейной, и подвижность μ_e зависит от поля. Но при теоретическом рассмотрении различных разрядных процессов, как правило, пользуются удобной линейной связью (7) с $\mu_e = \text{const}$. Для численных оценок выбирают разумное эффективное табличное значение [9]. Для наших расчетов коронного разряда на высоте $h = 5$ км при давлении $p = 410$ Торр принята величина $\mu_e = 1100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Полезная эмпирическая формула для α_i в воздухе при не очень больших E/p

$$\alpha / p = 1,17 \cdot 10^{-4} \left(\frac{E}{p} - 32,2 \right)^2, \quad \text{см}^{-1} \cdot \text{Торр}^{-1}. \quad (8)$$

Следует обратить внимание, что первичные электроны образуются во всем межкапельном пространстве и начинают дрейф под действием глобального и локальных полей в сторону концов вытянутых капель, где расположены анионы.



Зависимости концентрации зарядов одного знака в области размножения электронов для двух внешних электрических полей – $E_1 = 200$ В/м (а) и $E_2 = 5 \cdot 10^3$ В/м (б)

Но размножение электронов, в соответствии с (8), начинает происходить лишь в малых областях, где поле начинает превосходить критическое значение $E_{krit}/p > 3,2 \cdot 10^3$ В/(м·Торр). Тогда, согласно (5), критический радиус, внутри которого происходит размножение, оценивается по формуле

$$r_{krit} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{l_k^2 + \frac{Q_k l_k}{\pi \epsilon_0 E_{krit}}} - l_k \right). \quad (9)$$

Фоновая скорость ионизации v_0 на высоте 5 км для оценки концентрации затравочных электронов полагалась равной 23 с^{-1} , что согласуется с данными [1, 2], хотя расчеты показывают, что результат не зависит от начальной концентрации.

Генерация зарядов внутри объема критического радиуса r_{krit} может оцениваться на основании решения уравнения

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{\int_{r_k}^{r_{krit}} v_i(r) dr}{r_{krit} - r_k} N_q - k_{ii} N_q^2, \quad (10)$$

где $k_{ii} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ – константа скорости ион-ионной рекомбинации, частота ионизации $v_i(r)$ вычисляется по формулам (5) – (8). Уравнение (10) является достаточно грубой оценкой концентрации зарядов N_q . В нем предполагается, что ионы и электроны возникают в результате ионизации, затем электроны достаточно быстро охлаждаются и прилипают к молекулам. А исчезают заряды толь-

ко в результате ион-ионной рекомбинации. Прилипанием ионов к каплям воды пренебрегаем. Плазма в области ионизации квазинейтральна.

Оценки концентраций зарядов проведем для двух внешних электрических полей – $E_1 = 200$ В/м (рисунок, а) и $E_2 = 5 \cdot 10^3$ В/м (рисунок, б).

Усредненную по межкапельному объему плотность зарядов одного знака оценим по формуле

$$\bar{Q} = \frac{4}{3} \pi (r_{krit}^3 - r_k^3) N_q q_e, \quad (11)$$

где $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Таким образом, для рассмотренных двух случаев электрического поля E мы получаем $\bar{Q}_1 = 9$ нКл/м³ и $\bar{Q}_2 = 280$ нКл/м³.

Заключение

Таким образом, мы можем заключить, что рассмотренный механизм генерации зарядов на основе коронного разряда на каплях воды в состоянии обеспечить необходимую плотность зарядов в несколько нкл/м³. Установленный механизм генерации зарядов не отменяет индукционный и безындукционный механизмы [2], а лишь приводит к перераспределению ролей. Безындукционный механизм, по-видимому, играет существенную роль в начальной стадии формирования кучево-дождевого (грозового) облака, когда электрические поля внутри облака незначительны. По мере нарастания электрического поля на первый план выходят КРК и индукционный механизмы, приводя к дальнейшему усилению поля и ускорению предгрозовой зарядки облака.

Механизм КРК, по-видимому, играет существенную роль в развитии и поддержании тропических ураганов и циклонов, сопровождаемых интенсивной грозовой активностью. Мощные восходящие потоки теплого воздуха несут с собой насыщенные солью капли воды с поверхности океана, которые в свою очередь обеспечивают зарядку облаков, интенсифицируют процесс молниевых разрядов и таким способом поддерживают мощное энерговыделение в атмосфере на заряженных центрах конденсации [8]. Выход ураганов на сушу приводит к усилению трения ветра о поверхность земли, перекрытию доступа паров и капель воды с поверхности океана и, как следствие, достаточно быстрому ослаблению и прекращению существования циклона по мере исчерпания запасов влаги и электричества в облаках.

Поступила в редакцию 13.12.2010

Результаты настоящей работы в целом согласуются с результатами работы [10], где на качественном уровне оценивается возможность зажигания коронного разряда у поверхностного жидкого слоя заряженной градины.

Кроме того, следует отметить, механизм КРК может играть основную роль в собирании зарядов в облаке накануне молниевых разрядов [11].

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований РАН «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов».

Литература

1. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 779 с.
2. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах / А.А. Евтушенко, Е.А. Мареев // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45. – № 2. – С. 255 – 265.
3. Two types of vertical electrical structures in stratiform precipitation regions of mesoscale convective regions / T.C. Marshall, W.D. Rust // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1993. – Vol. 74. – № 12. – P. 2159 – 2170.
4. The electrical nature of storms / D.R. MacGorman, W.D. Rust. – Oxford: Oxford Univ. Press, 1998. – 380 p.
5. Lighting: physics and effects / V.A. Rakov, M.A. Uman. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. – 690 p.
6. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Нейтральный кластер и его влияние на электромагнитные эффекты в атмосфере / К.А. Боярчук, А.В. Карелин, Р.В. Широков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С. 537 – 549.
8. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К.А. Боярчук, А.В. Карелин, Р.В. Широков. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
10. О возможности зажигания коронного разряда у поверхности нелинейно-осциллирующего жидкого слоя на поверхности заряженной градины в однородном электростатическом слое / А.И. Григорьев, В.А. Коромыслов, С.О. Ширяева // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – № 8. – С. 22 – 31.
11. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозные разряды / А.В. Гуревич, А.Н. Караштин, В.А. Рябов [и др.] // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 7. – С. 779 – 790.

Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, т. 8-(496)-751-02-79, e-mail: avkarelin@mail.ru.