УДК 551.594.12

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЯ НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Чукина А.М., Чукин В.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, e-mail: chukina@meteolab.ru

Создана математическая модель процесса электризации аэрозолей в атмосфере. При моделировании учитывались поверхностные свойства аэрозолей и использовалось гамма-распределение аэрозолей по размерам. Описан процесс «сшивания» диффузионного и кинетического токов легких ионов на граничной поверхности вокруг аэрозоля, в результате чего в уравнение диффузионной электризации была введена кинетическая поправка. Выявлено, что при совпадении знака скачка потенциала на поверхности аэрозоля со знаком его заряда увеличивается захват аэрозолями легких ионов противоположного знака. В то же время эффективное значение коэффициента прилипания легких ионов к аэрозолям слабо изменяется в зависимости от заряда аэрозоля. Также показано, что изменение скачка потенциала на 0.1 В может приводить к изменению на два порядка коэффициента униполярности легких ионов, окружающих аэрозоль.

Ключевые слова: ионизация атмосферы, аэроионы, диффузионный режим электризации, кинетический режим электризации

INFLUENSING OF SURFACE AEROSOL PROPERTIES ON ELECTRIZATION PROCESS

Chukina A.M., Chukin V.V.

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, e-mail: chukina@meteolab.ru

Mathematical model of atmospheric aerosol electrization processes is created. In conducted simulation, the surface properties of aerosols have taken into account and used a gamma distribution of aerosols. The process of «sewing» of the diffusion and kinetic fluxes on the «boundary sphere» was described. As a result, the kinetic correction in the equation of diffision electrization was introduced. It was revealed that if the sign of potential on the aerosol surface and the sign of its charge are the same then aerosol capture light ions of opposite sign is increased. At the same time, the effective value of the attachment coefficient of light ions by aerosols varies slightly depending on the charge of an aerosol. It is also shown that the change in the potential of 0.1 V can lead to a change in the unipolarity coefficient two orders of magnitude.

Keywords: air ionization, air ions, deffusion regime of electrization, kinetic regime of electrization

Начало исследованиям физики аэрозолей было положено еще в конце XIX – начале XX века работами Р. Милликена, Дж. Вильсона, Дж. Гиббса. Однако, как область науки об атмосфере Земли физика аэрозолей сформировалась только несколько десятилетий назад. Подобный интерес возник, когда стало ясно, что атмосферные аэрозоли оказывают большое влияние на многие явления происходящие в атмосфере, такие как, например, преломление излучения в атмосфере, формирование капель в облаках и их электризация, перенос зарядов в атмосфере и др.

Частицы аэрозоля в атмосфере переносят на своей поверхности электрический заряд, поэтому можно с уверенностью утверждать об их связи с явлениями атмосферного электричества. Так, например, аэрозоли захватывая легкие ионы из окружающего воздуха уменьшают его проводимость, а также накопление на аэрозольных частицах заряда определенного знака приводит к увеличению объемного заряда. Для исследования связей между аэрозолями и атмосферным электричеством особый интерес представляют явления приобретения заряда первыми, т.е. механизмы электризации аэрозолей [1].

Математическая модель

Движение ионов к частице аэрозоля происходит как в результате диффузии ионов в воздухе, как и в результате воздействия электрического поля вокруг аэрозоля. Суммарные электрические токи через сферическую поверхность радиусом x можно описать дифференциальными уравнениями [1]:

$$I_+ = \left[-q_+ D_+ \frac{\partial N_+}{\partial x} + q_+ N_+ b_+ E \right] 4\pi x^2, \quad I_- = \left[-q_- D_- \frac{\partial N_-}{\partial x} + q_- N_- b_- E \right] 4\pi x^2 \qquad (1)$$

где q_+ и q_- – заряды положительных и отрицательных легких ионов, Кл; D_+ и D_- – коэффициенты диффузии положительных и отрицательных легких ионов, м^2/с; N_+ и N_- – концентрации положительных и отрицательных легких ионов, м$^{-3}$; b_+ и b_- – подвижности положительных и отрицательных легких ионов, м^2/(В с); x – расстояние до центра аэрозоля, м [3].

В результате решения дифференциальных уравнений (1) получаем следующее решение:

$$N_+ = \frac{I_+\varepsilon_0\varepsilon'}{q_+Qb_+} + C_+\exp\left(-\frac{q_+Qs}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' kT}\right),$$
$$N_- = \frac{I_-\varepsilon_0\varepsilon'}{q_-Qb_-} + C_-\exp\left(-\frac{q_-Qs}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' kT}\right) \quad (2)$$

где $s = \frac{1}{r}$. Дальнейшие преобразования уравнений для положительных и отрицательных ионов аналогичны, поэтому рассмотрим вывод уравнения для определения коэффициента прилипания на примере взаимодействия положительных легких ионов с аэрозолем.

Для положительных ионов коэффициент C_+ определяется из условий, что $N_+ = N_+^{\Delta}$ и $s = (r+\Delta)^{-1}$, так что

$$N_+^{\Delta} = \frac{I_+\varepsilon_0\varepsilon'}{q_+Qb_+} + C_+\exp\left(\frac{-q_+Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' kT(r+\Delta)}\right). \quad (3)$$

где r – радиус аэрозоля, м; Δ – толщина кинетического слоя, м.

В то время как при x → ∞, $N_+ = N_+^{\infty}$ и из уравнения (2):

$$N_+^{\infty} = \frac{I_+\varepsilon_0\varepsilon'}{q_+Qb_+} + C_+. \quad (4)$$

Выражая C_+ из уравнения (3) и подставляя его в (4) получаем выражение для тока положительных легких ионов с учетом слоя вокруг аэрозоля, где действует кинетический режим электризации:

$$I_+ = \frac{q_+Qb_+}{\varepsilon_0\varepsilon'} \cdot \frac{N_+^{\infty} - N_+^{\Delta}\exp\left(\frac{q_+Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' kT(r+\Delta)}\right)}{1\exp\left(\frac{q_+Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' kT(r+\Delta)}\right)}. \quad (5)$$

Согласно распределению Больцмана для тока на поверхность частицы в кинетическом режиме с учетом скачка потенциала на поверхности аэрозоля можно записать выражение [2, 4]:

$$I_+ = -\pi(r+\Delta)^2 q_+\overline{v_+}N_+^{\Delta}\exp\left(\frac{q_+Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon'(r+\Delta)}\right)\exp\left(\frac{-q_+Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' r}\right)\exp\left(\frac{q_+\phi_s}{kT}\right). \quad (6)$$

На границе перехода от диффузионного режима электризации к кинетическому токи одинаковы, поэтому уравнение для концентрации легких ионов на границе перехода можно описать уравнением:

$$N_+^{\Delta} = \frac{Qb_+N_+^{\infty}}{\exp\left(\frac{q_+\phi_{\Delta}}{kT}\right)\left[Qb_+ - \pi\varepsilon_0\varepsilon'(r+\Delta)^2\overline{v_+}\left[1-\exp\left(\frac{q_+\phi_{\Delta}}{kT}\right)\right]\exp\left(-\frac{q_+\phi_r}{kT}\right)\exp\left(\frac{q_+\phi_s}{kT}\right)\right]}. \quad (7)$$

где $\phi_r = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon' r}$ и $\phi_{\Delta} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon'(r+\Delta)}$ – потенциал аэрозоля на поверхности аэрозоля и на расстоянии Δ от поверхности, соответственно.

Подставляя выражение (7) в (5) получаем итоговое выражение для потока легких ионов на поверхность аэрозоля с учетом скачка потенциала на его поверхности:

$$I_+ = -q_+N_+^{\infty}\left[\frac{1}{\frac{1}{\beta_{dif}} + \frac{1}{\pi(r+\Delta)^2\overline{v_+}\exp\left(-\frac{q_+(\phi_r-\phi_s)}{kT}\right)}}\right]. \quad (8)$$

где $\beta_{dif} = -\frac{Qb_+}{\varepsilon_0\varepsilon'} \cdot \frac{1}{1-\exp\left(-\frac{q_+\phi_{\Delta}}{kT}\right)}$.

Соответственно для коэффициента прилипания легких ионов к аэрозолям можно записать выражение:

$$\beta_+ = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{dif}} + \frac{1}{\pi(r+\Delta)^2\overline{v_+}\exp\left[-\frac{q_+(\phi_r-\phi_s)}{kT}\right]}}. \quad (9)$$

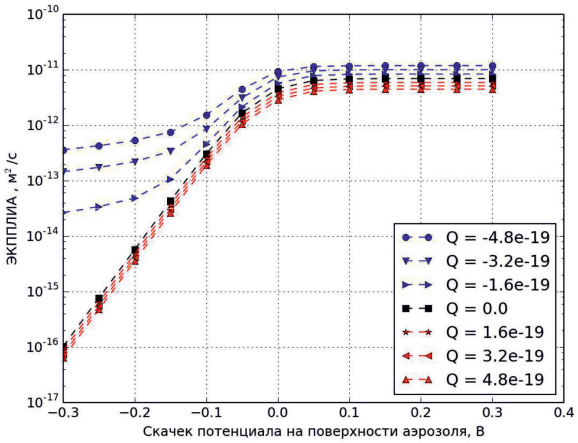

Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента прилипания положительных легких ионов к аэрозолям от скачка потенциала на его поверхности

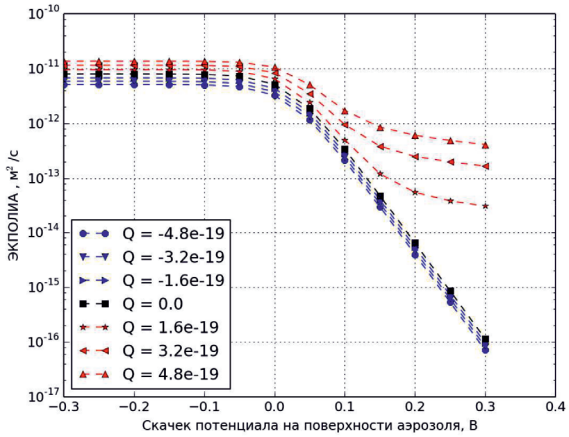

Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента прилипания отрицательных легких ионов к аэрозолям от скачка потенциала на его поверхности

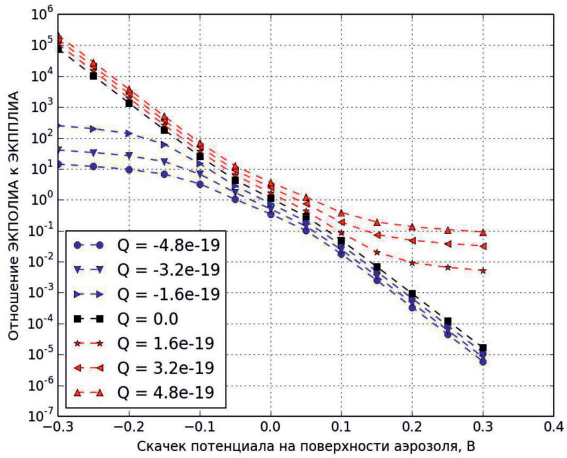

Рис. 3. Зависимость отношения эффективных коэффициентов прилипания легких ионов от скачка потенциала на поверхности аэрозоля

Эффективные значения коэффициентов прилипания легких ионов к аэрозолям определяются формулами:

$$\overline{\beta_+} = \frac{\int_0^\infty \beta_+(r) n(r)\, dr}{\int_0^\infty n(r)\, dr},$$

$$\overline{\beta_-} = \frac{\int_0^\infty \beta_-(r) n(r)\, dr}{\int_0^\infty n(r)\, dr}, \qquad (10)$$

где $n(r)$ – распределение аэрозолей по размерам; r – радиус аэрозоля, м.

Результаты численного моделирования

Нами проведено моделирование процессов электризации аэрозолей на примере «смешанного» типа электризации (диффузионный механизм электризации с поправкой на кинетический механизм) и с учетом поверхностных свойств аэрозолей. На рис. 1 и 2 изображены зависимости эффективных значений коэффициентов прилипания положительных ($\overline{\beta_+}$ – ЭКППЛИА) и отрицательных ($\overline{\beta_-}$ – ЭКПОЛИА) легких ионов, соответственно, от скачка потенциала при различных значениях заряда аэрозоля.

Из вышеприведенных рисунков видно, что при совпадении знака скачка потенциала на поверхности аэрозоля и знака его заряда увеличивается эффективное значение коэффициента прилипания легких ионов противоположного знака и резко уменьшает эффективное значение коэффициента прилипания для легких ионов того же знака. В то время как при противоположных по знаку значениях скачка потенциала на поверхности аэрозоля и его заряда практически не изменяется значение эффективного коэффициента прилипания легких ионов к аэрозолям.

На рис. 3 изображена зависимость отношения эффективных коэффициентов прилипания легких ионов к аэрозолям отрицательных по отношению к положительным. Это отношение также характеризует коэффициент униполярности ($\frac{\overline{\beta_-}}{\overline{\beta_+}} = \frac{N_+}{N_-}$). Видно, что изменение скачка потенциала на 0.1 В может приводить к изменению коэффициента униполярности на два порядка. Так например, при скачке потенциала равном – 0.3 В наблюдается значение $\frac{N_+}{N_-} \approx 10^5$. Зависимость же исследуемого отношения от заряда аэрозоля очень мала.

Заключение

В результате проведения математического моделирования явления электризации аэрозолей в атмосфере в зависимости от электрокинетического скачка потенциала на их поверхности и при различных значениях заряда аэрозолей была выявлена сильная зависимость эффективных коэффициентов прилипания легких ионов к аэрозолям при разноименных значениях скачка потенциала на поверхности аэрозоля и заряда легких ионов. В то время как при одноименных значениях заряда ионов движущихся к поверхности аэрозоля и скачка потенциала на его поверхности эффективные значения коэффициента прилипания легких ионов к аэрозолям практически не изменяются.

Поверхностные свойства аэрозолей оказывают сильное влияние на коэффициент униполярности. Так, например, при изменении значения скачка потенциала от 0 до – 0.1 В коэффициент униполярности может измениться от 1 до 100. Таким образом, изменение поверхностных свойств аэрозолей может в значительной степени влиять на пропорцию концентраций положительных и отрицательных легких ионов в атмосфере.

Список литературы

1. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – Спб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.

2. Мучник В.М. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере / В.М. Мучник, Б.Е. Фишман. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 191 с.

3. Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. – М.: Либроком, 2009. – 154 с.

4. White H. Particle charging in electrostatic precipitation. – Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., 1951, V.70, p. 1186-1206.