

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОССУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**О РОЛИ ИОНОВ ПРИ СВЕЧЕНИИ АТМОСФЕРЫ ПРИ  
ЗЕМЛЕТЯСЕНИИ**

**Выполнил студент**

**423 группы:**

**Готовцев Владислав Олегович**

**Научный руководитель**

**д. ф.-м. н., в. н. с. Бычков Владимир Львович**

**Москва. 2020 г.**

## **ВВЕДЕНИЕ**

В связи с задачами дистанционной диагностики областей над поверхностью Земли в период сейсмической и грозовой активности [1-2], стихийными бедствиями с появлением крупных частиц появляется интерес к процессам появления крупных светящихся частиц и вихрей в атмосфере и их эволюции [3]. К аналогичным событиям может приводить и зарядение крупных объектов, например, пластин электроскопов. При этом ион молекулярные процессы в приземном слое атмосферы часто бывают ответственными за макроскопические проявления атмосферных событий. К таким событиям можно отнести свечение атмосферы при землетрясениях. В работах [4-5] показано, что одним из основных индикаторов предвестников землетрясений является радон, который является главным источником  $\alpha$  частиц.

В связи с проблемой прогноза землетрясений представлена модель объясняющая механизмы приводящие к свечению в эпицентральных областях во время и после сейсмических событий [4-5] на основе предположения о том, что именно ионизация воздуха  $\alpha$  частицами приводит к зарядению пылевых частиц и капель до величины пробойного электрического поля вблизи их поверхности, рекомбинация которых с ионами в воздухе и проявляется в виде свечения.

Исследования, описанные в [4-5,1], позволяют по-новому взглянуть на проблему светящихся областей и привлечь к её объяснению ионизацию воздуха быстрыми частицами.

### **Модель**

Следуя [8-9], рассмотрим следующую последовательность событий. Под действием быстрых  $\alpha$  частиц происходит ионизация молекул воздуха. Образованные ионы заряжают крупные пылевые частицы фона и капельки до величин напряженностей электрического поля достаточных для ионизации воздуха. При этом процессы имеют место на фоне нейтрализации заряженных пылевых ионами воздуха. Данные о размерах области свечения воздуха и

времени свечения используются нами в дальнейшем для оценки размеров частиц.

На основе [8,9] напишем уравнение для определения заряжения пылевой частицы, например, положительным зарядом, при движении к ней положительных и отрицательных ионов:

$$\frac{dQ^+}{dt} = \frac{e}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_i}} \cdot 4\pi r_d^2 \cdot N_i^+ - e4\pi R^2 \cdot v_i^- N_i^- \quad (1)$$

Здесь  $e$ -заряд электрона,  $\sqrt{\frac{8kT}{\pi m_i}}$  - средняя тепловая скорость иона, падающего на поверхность первоначальной нейтральной пылевой частицы, радиусом  $r_d$ .  $N_i^+$ ,  $N_i^-$  - концентрации положительных и отрицательных ионов в воздухе,  $v_i^-$  - скорость дрейфа отрицательных ионов в поле заряжаемой положительно пылевой частицы,  $R$ - расстояние от отрицательного иона до полевой частицы,  $m_i$ -масса иона.

В этом уравнении первый член описывает зарядение пылевой частицы двигающимися в объёме положительными ионами. Второй член учитывает, что заряжаемая частица, притягивает к себе ионы противоположного знака, которые двигаются к ней с дрейфовой скоростью в поле заряженной полевой частицы. Она связана с подвижностью отрицательных ионов, зарядом пылевой частицы и её полем следующими соотношениями [8]:

$$v_i^- = \mu^- \cdot E^+ = \frac{\mu^- \cdot Q^+}{4\pi \epsilon \epsilon_0 \cdot R^2}, \quad (2)$$

где  $\mu^-$  - подвижность отрицательного иона,  $E^+$  - электрическое поле заряженной пылевой частицы,  $\epsilon \epsilon_0$  - диэлектрическая константа.

Из-за быстрого прилипания электронов к молекулам кислорода, заряженная область содержит положительные ионы азота и отрицательные ионы кислорода. При этом [12] концентрации ионов определяются в воздухе в условиях квазинейтральности, которое всегда выполняется, соотношениями:

$$N_i^+ = N_i^- = \sqrt{\frac{q_b}{\alpha_{ii}}}, \quad (3)$$

где  $q_b$  - источник ионов в воздухе,  $\alpha_{ii}$ -коэффициент ион-ионной рекомбинации положительных и отрицательных ионов [10].

Подставим формулы (2) и (3) в уравнение (1), получим:

$$\frac{dQ^+}{dt} = \frac{e\mu^- N_i^-}{\varepsilon\varepsilon_0} \left( \sqrt{\frac{8kT\pi}{m_i}} \cdot r_d^2 \cdot \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu^-} - Q^+ \right) \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$Q^+ = \sqrt{\frac{8kT\pi}{m_i}} r_d^2 \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu^-} (1 - \exp(-\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \mu^- N_i^- t)) \equiv \sqrt{\frac{8kT\pi}{m_i}} r_d^2 \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu^-} (1 - \exp(-\beta)). \quad (5)$$

### Определение основных параметров модели

Чтобы определить величину  $Q^+$ , нужно знать величины  $r_d^2$ ,  $N_i^-$  и время процесса зарядки  $t$ . Однако конкретные величины  $N_i^-$  и  $t$  неизвестны, и для их восстановления будем использовать данные о времени жизни и размере светящейся области [6], в которой описано, что форма которой описана представляет собой полусферу радиусом 10-100 м, а продолжительность свечения составляет 10-100 с.

Известно [4], что в области выхода радона и  $\alpha$ -частиц, скорость ионизации достигает величины  $q_b \sim 7 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ , в то время, как при нормальных условиях  $q_b \sim 4 \cdot \text{см}^3 \text{ с}^{-1}$ . Это при коэффициенте ион-ионной рекомбинации кислородных ионов в воздухе  $\alpha_{ii} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [4] даёт диапазон концентраций ионов в воздухе  $4,5 \cdot 10^3 - 1,9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Учтём, что  $\mu^- \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  [10] получим, что в формуле (5)  $1,6 < \beta < 69$ , т.е. экспонентой в (5) можно пренебречь, тогда расчетная формула для  $Q^+$  будет иметь простой вид:

$$Q^+ = \sqrt{\frac{8kT\pi}{m_i}} \cdot r_d^2 \cdot \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu^-}, \quad (6)$$

в которой параметр  $r_d^2$ , требует определения.

Для оценки величины  $r_d^2$  рассмотрим падение сферической частицы пыли на Землю под действием силы тяжести. Для этого напишем уравнение

движения для пылинки массы  $m_d = \frac{4\pi}{3} \cdot r_d^3 \cdot \rho$ , где  $\rho$  плотность материала

пылинки. Учтём, что при падении на частицу кроме силы тяжести действует сила Стокса [12] направленная в противоположную направлению падения сторону. Уравнение примет вид:

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = m_d g - 6\pi \cdot \lambda \cdot r_d \cdot v_d, \quad (7)$$

$g$ - ускорение свободного падения,  $\lambda$  - коэффициент физической вязкости воздуха. Решение этого уравнения:

$$v_d = \frac{m_d g}{6\pi \cdot \lambda \cdot r_d} (1 - \exp(-6\pi \cdot \lambda \cdot r_d \cdot t / m_d)) \equiv \frac{m_d g}{6\pi \cdot \lambda \cdot r_d} (1 - \exp(-\delta)). \quad (8)$$

При комнатной температуре  $\lambda \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ , а время падения времени существования светящейся области, 10-100 с (см выше). Предполагая, что плотность пылинки порядка величины плотности кремния, получим, что  $\delta = \frac{9 \cdot \lambda}{2r_d^2 \cdot \rho} t$  много больше 1 при  $r_d \sim 10^{-4} \text{ м}$ , т.е. при типичных размерах пылинок. Отсюда (8) следует, что частицы падают со скоростью:

$$v_d = \frac{2gr_d^2\rho}{9\lambda} \quad (9)$$

Используя данные наблюдений, о том, что средняя скорость падения  $v_d \approx 1 \text{ м} / \text{с}$  из (9) получим  $r_d = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ .

Из (6), определим величину электрического поля у поверхности частицы:  $E = Q^+ / (4\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot r_d^2) = \sqrt{\frac{8kT\pi}{m_i}} \cdot \frac{1}{4\pi\mu^-}$  (10)

Подставляя в неё массу и подвижность отрицательного иона кислорода (см. выше) получим  $E \approx 4,2 \cdot 10^5 \text{ В} / \text{м}$ . Это значение на порядок величины меньше, чем пробойное значение напряженности электрического поля в воздухе.

Если же частица не сферическая, а, например, цилиндрическая, у которой длина стенки  $L$  много больше, чем радиус плоскости оснований  $l_d$ , то у её плоских концов реализуется высокое электрическое поле порядка и выше пробойного, которое и обеспечивает ионизацию, а, следовательно, и рекомбинационное свечение.

### **Роль несферических части частиц**

Покажем влияние не сферичности на простом примере. Для этого будем рассматривать цилиндрическую частицу с той же массой, что у сферической, рассмотренной выше. Пусть ее длина боковой поверхности больше в 10 раз, чем у цилиндрической частицы, тогда отношение длины радиуса и полувысоты равно 22,4.

В этом случае напряженность электрического поля (без учета изменения поля у её краев) будет [13]: 
$$E = \frac{Q^+}{2\pi l_d^2 \cdot \epsilon \epsilon_0}$$

Подставляя в эту формулу определенные выше значения, получим  $E = 4,2 \cdot 10^6$  В/м, т.е. выше пробойного равного  $3 \cdot 10^6$  В/м.

### **Выводы**

Рассмотрены процессы ионизации и рекомбинации с участием частиц пыли и ионов, заряженных быстрыми частицами в сейсмических условиях. Показано, что последовательность ионизационных и рекомбинационных процессов может приводить к заряджению частиц пыли. В случае сферических частиц электрическое поле в воздухе у поверхности частицы достигает величины меньшей пробойного значения около 7,1 раз. В случае цилиндрических частиц той же массы с увеличенной в 10 раз длиной, по сравнению с диаметром сферической частицы, электрическое поле оказывается в 1,4 раза больше пробойной величины.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что в период сейсмической активности с появлением светящихся предвестников в воздухе, их появление определяется в первую очередь ионизацией молекул по действием быстрых  $\alpha$ -частиц, появляющихся при эманации радона из области сейсмической активности и разломов Земной коры.

### **Литература**

1. Арделян Н.В., Бычков В.Л., Голубков Г.В., Космачевский К.В. // Хим. физика. 2018. Т.37. № 1. С. 91.
2. Арделян Н.В., Бычков В.Л., Голубков Г.В., Голубков М. Г., Космачевский К. В. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 59.

3. Бычков В. Л., Антилов С. В., Савенкова Н. П. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 58.
4. Прогноз землетрясений возможен?! Под ред. С.А. Пулинца, М.: Тровант. 2014.
5. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.// УФН. 1998. Т.168. С.582.
6. Yasui Y. //Мем. Какиока Mag. Obs. 1968. № 13. P. 25.
7. Григорьев А.И., Гершензон Н.И., Гохберг М.Б. // Доклады АН СССР. 1988. Е.300. №5. 1087-1090.
8. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987.
9. Смирнов Б.М. Аэрозоли в газе и плазме. М.Ж ИВТАН, 1990.
10. Смирнов Б.М. Комплексные ионы. М.: Наука. 1983.
11. Арделян Н. В., Бычков В. Л., Волков С. А., Космачевский К. В., Кочетов И. В. //Хим. Физика. 2015. Т.34, № 10, С. 63.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. Наука, 1968.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 1982