

УДК 533.9

О ЗАРЯДЕ МИКРОЧАСТИЦ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А. М. Игнатов, С. А. Майоров

Рассмотрена модельная задача зарядки частиц субмикронных размеров под воздействием солнечного излучения на высоте порядка 90 км. В рамках построенной модели рассчитывается зависимость заряда частиц от объемной плотности частиц, их размера и вероятности ионизации за счет фотоэффекта. Проанализированы также и особенности функции распределения электронов по энергии.

Микрочастицы образуются в верхней атмосфере Земли при сгорании метеоритов и из-за переноса из нижних слоев пыли и аэрозолей [1–3]. Пылинки микронных и субмикронных размеров наблюдаются оптическими методами и называются серебристыми облаками (noctilucent clouds–NLC). Серебристые облака состоят из льдинок с включениями метеоритного вещества (обычно – металлов), что приводит к значительному понижению работы выхода электронов и увеличению роли фотоэффекта в процессе зарядки пылинок. Более мелкие наночастицы проявляются в виде так называемых радиоотражений излучения радаров на частоте 50–1000 МГц (Polar Meso-sphere Summer Echos–PMSE).

Из-за фотоэффекта пылинки теряют электроны, и в том случае, если фотоионизация является основным каналом зарядки пылинок, они приобретают положительный заряд. В настоящем сообщении рассмотрена модель зарядки пылинок, учитывающая влияние основных факторов – фотоэффект, рекомбинация электронов на пылинках, охлаждение электронов из-за столкновений с молекулами воздуха. Хотя эта модель и не учитывает всего многообразия процессов в верхней атмосфере Земли, но она позволяет анализировать зависимость параметров электронного газа от основных факторов – характеристик излучения, работы выхода электронов и коэффициента поглощения излучения микрочастицей.

Постановка задачи. Солнечная радиация на высоте порядка 90 км может быть приближена частью планковского спектра, обрезанного для излучения с длинами волн меньше 170 нм, и с коэффициентом ослабления за счет геометрического фактора:

$$I(\epsilon) = \beta \epsilon^3 / [(1 - \exp(\epsilon/T_{\text{solo}}))]. \quad (1)$$

Здесь T_{solo} – температура Солнца, ϵ – энергия фотона, β – коэффициент ослабления излучения. Число фотонов, поглощаемых частицей в единицу времени, равно

$$\Delta N_{\text{ephoto}}(\epsilon - A, \epsilon - A + \Delta\epsilon) = \pi a^2 n_{\text{dust}} I(\epsilon) \Delta\epsilon. \quad (2)$$

Энергия образовавшегося за счет фотоэффекта электрона равна

$$\epsilon_{\text{electron}} = \epsilon_{\text{photon}} - A, \quad (3)$$

где A – работа выхода электрона.

Положим, что фотоэффект является основным каналом зарядки пылинок и электроны являются основными носителями заряда. Тогда пылинка будет заряжена в среднем положительно, а вырванный электрон может считаться свободным, только если его кинетическая энергия больше потенциальной энергии связи с пылинкой. Для случая разреженной плазмы, в пренебрежении экранированием, для поверхностного потенциала имеем связь с зарядом пылинки и ее радиусом [4] $\varphi_s = q_{\text{dust}}/a$, где φ_s – поверхностный потенциал пылинки.

Если энергии вырванного электрона недостаточно для преодоления силы электростатического притяжения пылинки, то он, совершив движение по эллиптической орбите, столкнется с ее поверхностью и рекомбинирует на ее поверхности.

Свободный электрон будет двигаться, сталкиваясь с молекулами воздуха и обмениваясь с ними энергией. Но поскольку кинетическая энергия электрона после ионизации в среднем значительно больше тепловой энергии атомов, то в каждом упругом столкновении он будет терять часть своей энергии. В среднем потеря энергии при столкновении с медленной частицей определяется отношением масс и по порядку величины равна

$$\Delta K_e = K_e \frac{m_e}{M_a}. \quad (4)$$

Тогда для кинетической энергии электрона K_e после интервала времени Δt получаем оценку

$$K_e(t + \Delta t) = K_e(t) - (K_e(t) - K_{\text{atom}}) \exp(-m_e \Delta t / M_a \tau_{ea}), \quad (5)$$

где K_{atom} – средняя кинетическая энергия атомов, m_e и M_a – массы электрона и атома. Здесь кинетическая энергия данного электрона определяется его скоростью: $K_e = m_e v_e^2 / 2$, кинетическая энергия атомов задается через их температуру, а частота столкновений электрона с атомами определяется скоростью электрона, плотностью атомов и сечением упругих столкновений: $\nu_{ea} = 1/\tau_{ea} = \sigma_{ea}(v_e)n_a v_e$. Для сечения столкновения электрона с молекулой азота использовалась аппроксимация:

$$\sigma_{eN_2}(v_e) = 10^{-15} \{1 - 0.8 \exp[-(\epsilon + 0.025)^2 / 0.02] + 2.4 \exp[-(\epsilon - 2.7)^2 / 0.5]\} \text{cm}^2.$$

Сечение неупругих столкновений с возбуждением колебательных степеней молекул для энергий электрона меньше 5 эВ очень малы [4–6] и нами не рассматриваются, хотя в работе [3] полагается, что именно возбуждение колебательных степеней молекул азота приводит к эффективному охлаждению электронов до температуры 0.01 эВ.

Метод моделирования. Сведем задачу определения характеристик зарядки пылинок [7, 8], распределенных равномерно в пространстве с плотностью n_{dust} , к рассмотрению временной эволюции заряда одной пылинки, помещенной в элементарный объем, приходящийся на одну пылинку.

Итак, пусть в некоторый момент времени имеем заряд пылинки и определенное число свободных электронов с известными энергиями. Тогда для каждого электрона рассчитывается вероятность за промежуток времени столкнуться с пылинкой и разыгрывается это событие. Если выпадает столкновение с пылинкой, то электрон гибнет и заряд пылинки уменьшается на заряд электрона. Если электрон не сталкивается с пылинкой, то пересчитывается его кинетическая энергия по формуле (5), учитывающей охлаждение электронов из-за столкновений с молекулами азота.

Затем разыгрывается вероятность поглощения пылинкой фотона с энергией больше, чем работа выхода. Если это событие происходит, то проверяется, будет ли рожденный электрон свободным или связанным. Если электрон связан, то при определении плотности связанных электронов учитывается время, за которое он пройдет половину кеплеровой орбиты. Если электрон свободен, то заряд пылинки увеличивается на заряд электрона, далее рассматривается эволюция всех старых и нового электрона. Алгоритм моделирования во многом аналогичен алгоритму из работы [8], но с добавлением процедуры изменения энергии электронов из-за упругих столкновений и внешних граничных условий, учитывающей присутствие других пылевых частиц с заданной объемной плотностью.

Результаты расчетов. Приведем результаты нескольких расчетов для плотности

пылинок $n_{\text{dust}} = 10^2 \text{ см}^{-3}$. В таблице собраны данные для характеристик зарядки пылинок нескольких размеров.

Т а б л и ц а
Характеристики зарядки пылинок различного размера
при концентрации $n_{\text{dust}} = 10^2 \text{ см}^{-3}$

Радиус, μm	0.002	0.01	0.1	1	2
Заряд, Q/e	3.11	11.2	72.1	402	601
Флуктуации заряда ΔQ_{Dust}	0.67	1.5	4.4	11.4	14.3
Потенциал пылинки $e\varphi_s$, eV	2.16	1.44	1.11	0.59	0.45
$T_{\text{eff}} = \langle \epsilon \rangle / 2/3$, eV	0.012	0.011	0.045	0.299	0.364

Приведенные в таблице результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы относительно зависимости характеристик зарядки частиц от их размера при фиксированной плотности пылинок в единице объема:

1) в случае маленьких пылинок (до 100 нм) электроны находятся в тепловом равновесии с атомами газа, а сами пылинки имеют большой поверхностный потенциал;

2) для пылинок микронного размера получено, что электронная температура определяется температурой фотоионизатора (т.е. температурой солнечного излучения), а поверхностный потенциал пылинок значительно ниже.

Обсуждение и выводы. Для анализа полученных результатов полезно рассмотрение простой задачи о поглощении потока монохроматического излучения и рекомбинации моноэнергетичных электронов на поверхности пылинок – без учета влияния заряда пылинки и охлаждения электронов.

В единице объема за единицу времени в результате фотоэффекта появится

$$J_{\text{e photo}}(\epsilon - A) = \pi a^2 n_{\text{dust}} c \gamma n_{\text{photon}}(\epsilon) \quad (6)$$

электронов. Здесь c – скорость света, γ – число фотоэлектронов, появляющихся при поглощении одного фотона, n_{photon} – число фотонов в единице объема.

В единице объема за единицу времени в результате рекомбинации электронов на поверхности пылинок исчезнет

$$J_{\text{e rec}}(v_e) = 4\pi a^2 v_e n_e n_{\text{dust}}. \quad (7)$$

электронов. Скорость электронов и энергия фотонов определяются из соотношения (3).

Плотность электронов, определенная из условия баланса фототока (6) и рекомбинации электронов на поверхности пылинок (7), не зависит от объемной плотности и размера пылинок. Из этого следует, что при заданной плотности пылинок маленькие пылинки будут иметь тот же заряд, что и большие, и соответственно с уменьшением пылинок будет увеличиваться их поверхностный потенциал. Высокий потенциал на поверхности пылинок будет препятствовать появлению свободных электронов. Кроме того, маленький размер пылинок будет приводить к увеличению времени рекомбинации электронов и тем самым способствовать их охлаждению за счет столкновений с молекулами холодного воздуха. Оба этих фактора приводят к полученной в расчете зависимости характеристик зарядки от размера пылинок при их фиксированной объемной плотности.

Возможно, что высокий поверхностный потенциал может приводить к росту пылинок за счет поляризационного взаимодействия с молекулами воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 06-08-01554-а и 08-02-00791-а) и Нидерландского научного общества NWO (грант 047.017.2006.007).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Klumov, S.I. Popel, R. Bingham, Письма в ЖЭТФ **72**(7), 524 (2000).
- [2] Б. А. Клумов, С. В. Владимиров, Г. Е. Морфилл, Письма в ЖЭТФ **82**(10), 714 (2005).
- [3] Б. А. Клумов, Г. Е. Морфилл, С. И. Попель, ЖЭТФ **127**(1), 171 (2005).
- [4] И. Мак-Даниэль, *Процессы столкновений в ионизованных газах* (М., Мир, 1967).
- [5] И. Мак-Даниэль, Э. Масон, *Подвижность и диффузия ионов в газах* (М., Мир, 1976).
- [6] Дж. Хастед, *Физика атомных столкновений* (М., Мир, 1965).
- [7] С. А. Майоров, Физика плазмы **31**(8), 749 (2005).
- [8] T. Matsoukas and M. Russel, Phys. Rev. E **55**(1), 55 (1997).

Институт общей физики

им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 11 января 2009 г.