

**О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПЫЛЕВОЙ ЗВУКОВОЙ МОДЫ В ЭКЗОСФЕРЕ ЛУНЫ****С.И. Копнин, Т.И. Морозова, С.И. Попель****ON THE POSSIBILITY OF EXISTENCE OF DUST ACOUSTIC MODE  
IN THE LUNAR EXOSPHERE****S.I. Kopnin, T.I. Morozova, S.I. Popel**

Рассмотрена плазменно-пылевая система в приповерхностном слое Луны под воздействием солнечного излучения. Определены характерные параметры запыленной экзосферы Луны. Показана возможность существования нелинейных волновых структур пылевой звуковой моды. Определены области существования и основные параметры пылевых звуковых солитонов в приповерхностном слое экзосферы Луны.

We consider the plasma-dust system in the Moon's surface layer under solar radiation. Main characteristic parameters of the dusty lunar exosphere are determined. The possibility of existence of nonlinear wave structures of dust acoustic mode is shown. Regions of existence and the basic parameters of dust acoustic solitons in the surface layer of the Moon's exosphere are found.

Поверхность Луны покрыта пылевым слоем толщиной несколько сантиметров, она постоянно разрушается и преобразовывается, подвергаясь тепловым деформациям и воздействиям микрометеорных тел, что приводит к перемешиванию пылевых частиц. Данные анализа микрометровых частиц лунного грунта приведены в работе [Colwell, 2007], на основе которых можно сделать вывод, что типичные размеры пылевых частиц на поверхности Луны составляют 50–70 мкм. При этом распределение частиц по размерам простирается в том числе и в область наномасштабных частиц, размеры которых составляют доли микрометра. По данным из работы [Colwell, 2007] найдена функция распределения частиц:

$$f(a) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma a^4}} \exp\left\{-\frac{[\ln(a) - Ln]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где  $N_0 = 6.8 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$  – концентрация пылевых частиц, на единицу площади поверхности Луны, параметр распределения  $\sigma = 1.29$ ,  $Ln = \ln(61.56)$  – медиана распределения,  $a$  – размер пылевой частицы в микрометрах.

Под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы магнитосферы Земли поверхность Луны заряжается. При взаимодействии с солнечной радиацией поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов толщиной порядка 1 м [Колесников, 1982; Stubbs, 2006]. В результате происходит формирование у поверхности Луны электрических полей, напряженность которых может составлять сотни В/м (например, согласно [Колесников, 1982; Stubbs, 2006], максимальное значение  $E$  у поверхности Луны составляет 950 В/м):

$$E(h, \theta) = \frac{2T_{e\text{ph}}}{e} \frac{r_D^{-1} \sqrt{\cos \theta}}{1 + hr_D^{-1} \sqrt{\cos \theta}}, \quad (2)$$

где  $T_{e\text{ph}}$  – температура фотоэлектронов,  $h$  – высота над поверхностью Луны,  $\theta$  – угол между направлением потока солнечного излучения и нормалью к поверхности Луны,  $e$  – заряд электрона,  $r_D = \sqrt{T_{e\text{ph}}/4\pi e^2 n_{e\text{ph}}}$  – радиус Дебая для фотоэлек-

тронов,  $n_{e\text{ph}}$  – концентрация фотоэлектронов.

Такие поля могут вызвать подъем одновременно заряженных пылевых частиц. Таким образом, экзосфера у поверхности Луны может содержать заряженные пылевые частицы, фотоэлектроны от поверхности Луны, а также электроны и ионы солнечного ветра.

Вертикальная динамика пылевых частиц над поверхностью Луны описывается выражением:

$$m_d \frac{d^2 h}{dt^2} = q_d(h, \theta) E(h, \theta) - m_d g h, \quad (3)$$

где  $m_d$  – масса пылевых частиц,  $g$  – ускорение свободного падения у поверхности Луны.  $q_d(h, \theta) = eZ_d(h, \theta)$  – заряд пылевой частицы,  $Z_d(h, \theta)$  – зарядовое число.

Эволюция заряда определяется выражением:

$$\frac{\partial q_d}{\partial t} = I_e(q_d) + I_i(q_d) + I_{ph}(q_d) + I_{e\text{ph}}(q_d). \quad (4)$$

Здесь  $I_e(q_d)$  и  $I_i(q_d)$  – электрические токи на пылевую частицу электронов и ионов солнечного ветра,  $I_{ph}(q_d)$  – ток фотоэффекта и  $I_{e\text{ph}}(q_d)$  – ток фотоэлектронов.

Численное решение системы (1)–(4) позволяет определить основные параметры экзосферы вблизи поверхности Луны: распределение по размерам пылевых частиц над поверхностью Луны, а также их электрические заряды в зависимости от высоты и угла  $\theta$ , максимальные высоты подъема пылевых частиц для различных углов  $\theta$  и зависимость концентрации фотоэлектронов от высоты. Следует отметить, что фотоэффект, определяемый активностью Солнца, играет здесь ключевую роль. В зависимости от солнечной активности и материала лунного грунта для расчетов были выбраны следующие параметры  $n_{e\text{ph}0} = 2.08 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e\text{ph}} = 0.15 \text{ эВ}$  (рис. 1) и  $n_{e\text{ph}0} = 293 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e\text{ph}} = 1.93 \text{ эВ}$  (рис. 2).

Наличие заряженных пылевых частиц в экзосфере Луны определяет новые пространственно-временные масштабы, связанные с пылевой звуковой модой. Интерес представляет рассмотрение возможности существования нелинейных волновых структур, связанных с пылевой звуковой модой, например, таких как пылевые звуковые солитоны в экзосфере Луны.

Основные уравнения, описывающие распространение пылевых звуковых солитонов:

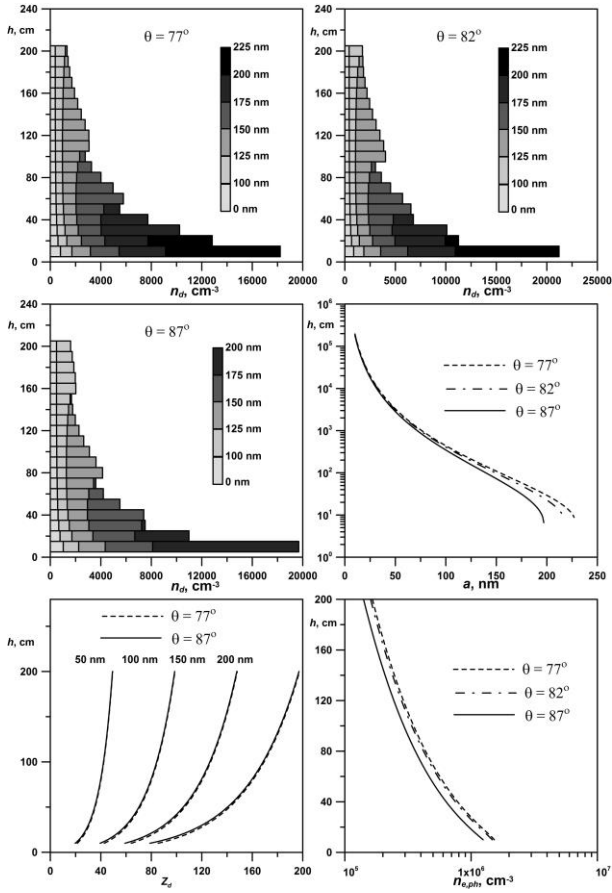


Рис. 1. Параметры экзосферы Луны для случая, когда  $n_{e\text{ ph}0} = 2.08 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e\text{ ph}} = 0.15 \text{ эВ}$ .

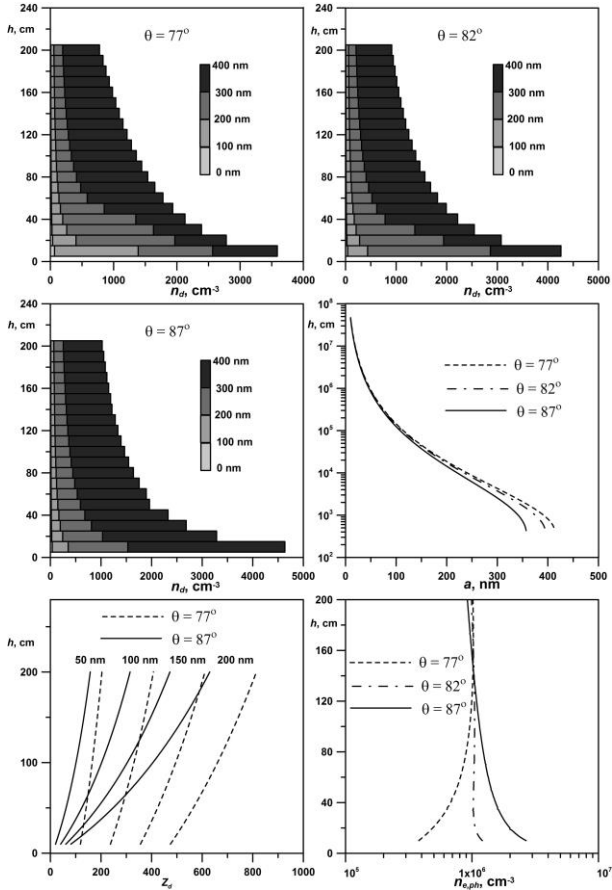


Рис. 2. Параметры экзосферы Луны для случая  $n_{e\text{ ph}0} = 293 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e\text{ ph}} = 1.93 \text{ эВ}$ .

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} n_d v_d = 0, \quad \frac{\partial v_d}{\partial t} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial x} = -\frac{e Z_d}{m_d} \frac{\partial \varphi}{\partial x},$$

$$n_{e\text{ ph}} = n_{e\text{ ph}0} e^{e\varphi/T}, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 4\pi e (n_{e\text{ ph}} - Z_d n_d), \quad (5)$$

где  $n_d$  и  $v_d$  – концентрация пылевых частиц,  $\varphi$  – электростатический потенциал.

Используя стандартный метод сагдеевского потенциала, уравнение Пуассона можно привести к виду, аналогичному закону сохранения энергии в механике,

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \xi}\right)^2 / 2 + V(\varphi) = 0, \quad (6)$$

где сагдеевский потенциал имеет вид:

$$V(\varphi) = 1 - \exp(\varphi) + |M| d \times \left( |M| - \sqrt{M^2 + 2Z_{d0} \varphi} \right) \quad (7)$$

и в выражения введены безразмерные величины  $\varphi$  и  $M$ , получаемые из их размерных аналогов с помощью следующей процедуры:  $e\varphi/T_e \rightarrow \varphi$ ,  $M/c_d \rightarrow M$ , а также параметры  $d = n_{d0}/n_{e0}$  и  $c_d = \sqrt{T_i/m_d}$ .

Необходимыми условиями существования пылевых звуковых солитонов являются условие локального максимума сагдеевского потенциал  $V(\varphi)$  в точке  $\varphi=0$  и условие того, что уравнение  $V(\varphi)=0$  должно иметь действительное решение  $\varphi=\varphi_0 \neq 0$ , которое определяет амплитуду солитона  $\varphi_0$  как функцию  $M$ .

Локальный максимум сагдеевского потенциала  $V(\varphi)=0$  в точке  $\varphi=0$  существует, если  $M^2 > Z_{d0}^2 d / (1 + Z_{d0} d)$ , что является следствием неравенства  $d^2 V(\varphi) / d\varphi^2 \big|_{\varphi=0} < 0$ .

Из (5)–(6) можно получить профили амплитуд солитонов  $\varphi_0$  для различных высот и углов  $\theta$  с учетом полученных параметров запыленной экзосферы Луны. Например, на рис. 3 представлены амплитуды солитонов, соответствующие параметрам экзосферы, представленным на рис. 1.

В качестве примера для  $\theta=82^\circ$  показаны характерные профили солитонов (рис. 4) и сагдеевских потенциалов (7).

Таким образом, взаимодействие пылевых частиц и поверхности Луны с солнечным ветром, излучением Солнца, а также фотоэлектронами может приводить к их зарядке. При этом возможно выполнение условий, при которых может происходить подъем пылевых частиц над поверхностью Луны.

Установлено, что подъем нано- и микромасштабных частиц над поверхностью Луны достаточно интенсивный. Указанные процессы приводят к формированию запыленной экзосферы Луны с параметрами, удовлетворяющими возможности существования и распространения нелинейных волновых структур, связанных с пылевой звуковой модой, таких как пылевые звуковые солитоны. Таким образом, возможно, в миссиях «Луна-ресурс» и «Луна-глоб» удастся произвести наблюдения динамики пылевых частиц и связанные с ней коллективные (волновые эффекты) в окрестностях Луны и получить достаточно

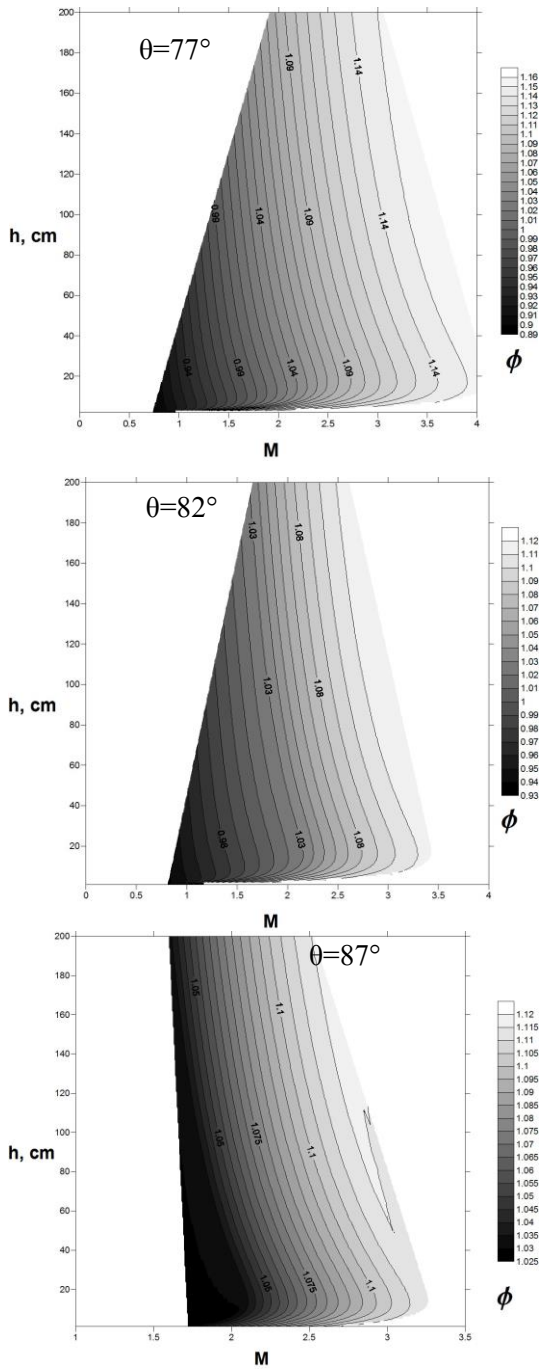


Рис. 3. Профили амплитуд солитонов  $\phi_0$  в экзосфере Луны, полученные для параметров, представленных на рис. 1.

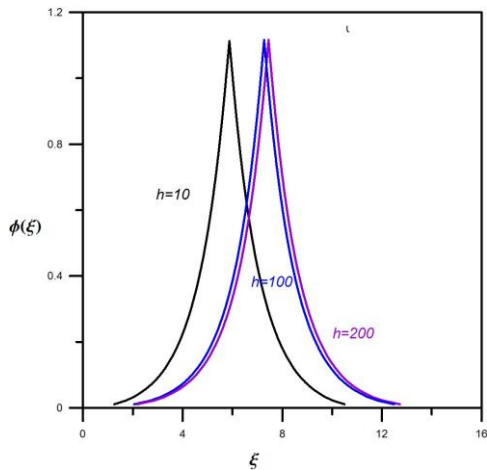


Рис. 4. Профили пылевых звуковых солитонов.

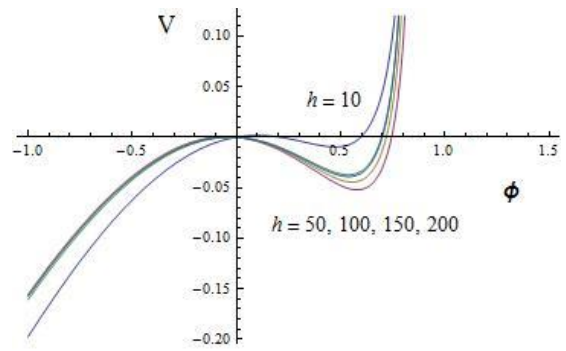


Рис. 5. Сагдеевский потенциал  $V(\phi)$ .

качественный экспериментальный материал для последующей обработки.

Работа выполнена по Программе № 5 фундаментальных исследований ОНЗ РАН, Программе № 22 фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», Программе Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-203.2012.5) для поддержки ведущих научных школ, Программе РФФИ (проект № 12-02-00270-а), гранту Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых (грант № МК-3764.2013.2). Выражаем также благодарность фонду «Династия» за финансовую поддержку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесников Е.К., Мануйлов А.С. // Астрон. журнал. 1982. Т. 59, № 5. С. 996–998.  
 Colwell J.E., Batiste S., Horanyi M., et al. // Rev. Geophys. 2007. V. 45. P. 26.  
 Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 59–66.

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия