

УДК 523.36; 533.951

*С. И. Копнин, Т. И. Морозова, С. И. Попель*Институт космических исследований РАН  
Московский физико-технический институт (государственный университет)

## Пылевые звуковые солитоны у поверхности Луны

Приведено описание плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Луны, которая включает в себя фотоэлектроны, электроны и ионы солнечного ветра, а также заряженные пылевые частицы. Рассмотрены пылевые звуковые солитоны в приповерхностной лунной плазме. Показано, что при их описании следует учитывать эффект захвата электронов потенциальными стенками, существование которых обусловлено положительным электростатическим потенциалом солитона. Определены области возможных чисел Маха и амплитуд солитонов. Найдены солитонные решения для различных высот над лунной поверхностью. Показано, что солитоны у поверхности Луны могут обладать довольно большими амплитудами, что дает возможность наблюдать их в рамках будущих лунных миссий «Луна-25» и «Луна-27».

**Ключевые слова:** пылевая плазма, пылевые звуковые волны, захваченные электроны, солитоны, Луна.

*S. I. Kopnin, T. I. Morozova, S. I. Popel*Space Research Institute RAS, 117997 Moscow, Russia  
Moscow Institute of Physics and Technology, 141700 Dolgoprudny, Russia

## Dust acoustic solitons on the surface of the Moon

The dusty plasma system at the near-surface layer of the illuminated part of the Moon is described. The dusty plasma system includes photoelectrons, electrons and the solar wind ions, as well as charged dust particles. Dust acoustic solitons are considered in the near-surface lunar plasma. It is shown that when describing the solitons, one should take into account the effect of electron trapping by potential wells which are due to the positive electrostatic soliton potential. The regions of possible Mach numbers and soliton amplitudes are determined. Soliton solutions are found for different altitudes over the lunar surface. It is shown that the solitons on the surface of the Moon can have rather large amplitudes, which enable us to observe them within the frames of the future lunar missions of «Luna-25» and «Luna-27».

**Key words:** dusty plasma, dust acoustic waves, trapped electrons, solitons, the Moon.

### 1. Введение

В настоящее время немаловажная роль в космических исследованиях принадлежит выявлению свойств и проявлений заряженной пыли у поверхности Луны и в лунной экзосфере. В России готовятся миссии «Луна-25» и «Луна-27». На посадочных модулях станций «Луна-25» и «Луна-27» предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения.

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на лунной поверхности составляет несколько сантиметров. Во время космических миссий кораблей «Аполлон» к Луне было замечено, что

солнечный свет рассеивается в области терминатора, что, в свою очередь, приводит к формированию лунных зорь («lunar horizon glow») и стримеров над лунной поверхностью. Последующие наблюдения показали, что при этом рассеяние солнечного света наиболее вероятно происходит на заряженных пылевых частицах, источником которых служит поверхность Луны [1]. На основе данных спускаемых космических аппаратов Surveyor был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами около 5 мкм могут подниматься над поверхностью Луны на высоты порядка 10 см. В миссиях «Аполлон» проводились наблюдения субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до (примерно) 100 км. Аналогичные выводы можно сделать из недавних наблюдений лунного орбитального аппарата LADEE [2].

Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы [3]. Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Анализ плазменно-пылевого слоя, образующегося вблизи освещенной части поверхности Луны, был проведен в работе [3]. В результате были определены характерные параметры плазменно-пылевой системы над поверхностью освещенной части Луны, что представляется важным с точки зрения развития экспериментальных методов анализа частиц лунной пыли, выявления свойств плазмы над Луной, измерения электрических полей у лунной поверхности в рамках будущих лунных миссий и т.д. Важное место в исследованиях свойств плазмы занимает изучение волновых процессов [4]. Данная работа посвящена рассмотрению пылевых звуковых солитонов – нелинейных плазменных волн над освещенной частью Луны, которые могут существовать и, возможно, иметь те или иные экспериментальные проявления.

## 2. Плазменно-пылевая система

Рассмотрим плазменно-пылевую систему в приповерхностном слое над освещенной частью Луны в ситуации, когда Луна не находится в хвосте магнитосферы Земли, и, соответственно, влияние плазмы хвоста магнитосферы на освещенную сторону Луны несущественно. В этой ситуации составными частями плазменно-пылевой системы являются электроны и ионы солнечного ветра, заряженные частицы пыли, фотоэлектроны, образующиеся при взаимодействии с солнечным излучением поверхности Луны и пылевых частиц, парящих над поверхностью Луны.

Вычисление распределений пыли и электронов в приповерхностном слое освещенной части Луны производится на основе теоретической модели [3], в которой зарядка пылевых частиц над поверхностью Луны вычисляется на основе зондовой модели с учетом влияния фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также солнечного излучения. Не учитывается воздействие светового давления на динамику пылевых частиц, поскольку, как показывают оценки, указанное воздействие сказывается лишь для частиц с размерами, заведомо не превышающими 1 нм. Производится учет фотоэлектронов как от лунной поверхности, так и от поверхностей парящих над Луной пылевых частиц. Рассмотрение фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц требует самосогласованного описания, поскольку фотоэлектроны влияют на распределения пылевых частиц, в то время как рас-

пределения пылевых частиц определяют количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить ее удается только численными методами, использующими итерации. В нулевом приближении пренебрегается эффектами фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц. При этом определяются распределения пыли над поверхностью Луны. После чего вычисляются распределения фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц для тех распределений пыли, которые были рассчитаны на предыдущем шаге. Далее, вычисляются распределения пыли, но уже с новыми распределениями фотоэлектронов над поверхностью Луны. Затем для так вычисленных распределений пыли определяются распределения фотоэлектронов и т.д.

В табл. 1 приведены параметры фотоэлектронов (концентрация  $N_0$  и температура электронов  $T_e$ ), рассчитанные [5] при  $\cos\theta = 1$  (здесь  $\theta$  – угол между местной нормалью и направлением на Солнце), в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности, соответствующей солнечной вспышке класса X28 (столбец I), солнечному максимуму (столбец II) и солнечному минимуму (столбец III), и различных значений квантового выхода (строки, характеризующие индексом “Y1” в  $N_0$  и  $T_e$  соответствуют квантовому выходу из работы [6], а индексом “Y2” – квантовому выходу из работы [7]). Из табл. 1 видно, что существенная разница в значениях квантового выхода [6] и [7] приводит к совершенно различным характеристикам фотоэлектронов у поверхности Луны, полученным в расчетах. Зависимость параметров  $N_0$  и  $T_e$  от солнечной активности не столь существенная. Различия в квантовом выходе [6] и [7] также существенно более сильно сказываются на расчетах, чем вариации работы выхода  $W$  ( $5\bar{\nabla} \cdot 6$  эВ). Значения  $N_0$  при  $\cos\theta \neq 1$  получаются умножением данных табл. 1 на значение  $\cos\theta$ . Электронная температура  $T_e$  не зависит от  $\cos\theta$ .

Т а б л и ц а 1

**Параметры фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности и различных значений квантового выхода**

	I	II	III
$N_{0Y1}, \text{см}^{-3}$	$2.2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^5$
$T_{eY1}, \text{eV}$	0.2	0.1	0.1
	I	II	III
$N_{0Y2}, \text{см}^{-3}$	$8.6 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$
$T_{eY2}, \text{eV}$	2.1	1.9	1.3

Данные, характеризующие распределения пылевых частиц для условий, соответствующих участкам лунного реголита ( $W = 6$  эВ, квантовый выход [6]), полученные на основе метода, развитого в [3], приведены на рис. 1 для данных  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \text{см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.15$  эВ. На рис. 1 (а)–(с) представлены гистограммы, описывающие результаты расчетов концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов  $\theta$  между местной нормалью и направлением на Солнце, равных  $77^\circ$ ,  $82^\circ$  и  $87^\circ$ . Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из этих графиков характеризует концентрацию частиц (в  $\text{см}^{-3}$ ) на соответствующих высотах  $h$  с размерами в соответствующем интервале (указанном на шкале в верхней правой части графика). Общая длина горизонтального участка на графике соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом графике. Рис. 1 (d)–(f) представляют соответственно результаты вычислений максимально возможных высот подъема пылевых частиц различных размеров, высотных распределений зарядовых чисел  $Z_d$  пылевых частиц ( $q_d = Z_d e$ ,  $q_d$  – заряд пылевой частицы,  $-e$  – заряд электрона) и концентраций фотоэлектронов для различных значений угла  $\theta$ .

Ниже приведенные в данном разделе данные используются для анализа пылевых звуковых солитонов в приповерхностной лунной плазме.

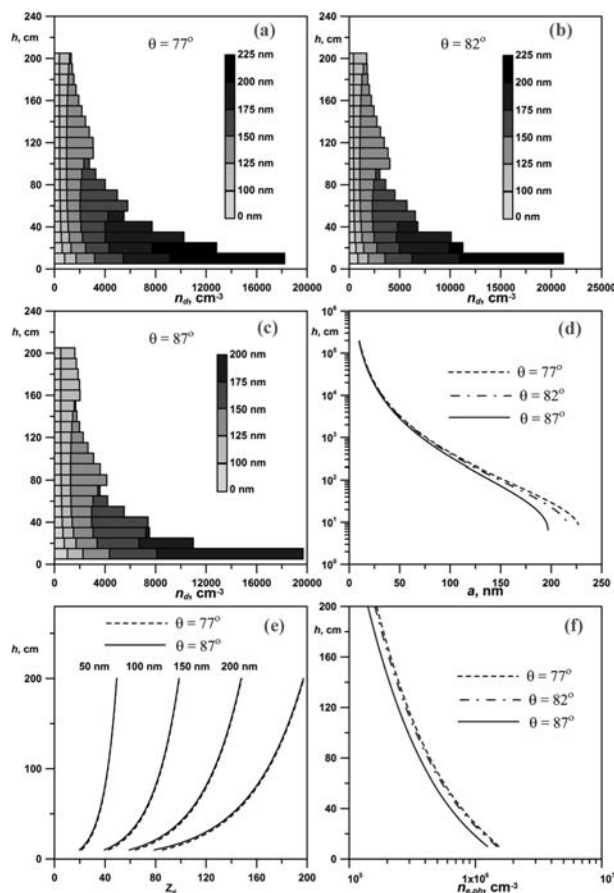


Рис. 1. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений  $\theta = 77^\circ$  (a),  $82^\circ$  (b),  $87^\circ$  (c), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (d), высотные распределения зарядовых чисел  $Z_d$  пылевых частиц (e) и концентраций фотоэлектронов (f) для условий, соответствующих участкам лунного реголита

### 3. Солитоны

Важным видом нелинейных волн, свойственных плазменным средам, являются солитоны. Их исследования проводятся интенсивно для самых разнообразных видов плазменных сред. Для пылевой плазмы типичным видом колебаний являются пылевые звуковые волны [8]. Рассмотрим пылевые звуковые солитоны, которые могут существовать в приповерхностной лунной плазме и распространяться вдоль поверхности Луны, в зависимости от высоты над лунной поверхностью.

Одномерное распространение пылевых звуковых возмущений вдоль поверхности Луны описывается системой уравнений, включающей в себя, в частности, уравнение непрерывности и уравнение Эйлера для пылевой компоненты, уравнение Пуассона:

$$\begin{aligned} \partial_t n_d + \partial_x (n_d v_d) &= 0, & \partial_t v_d + v_d \partial_x v_d &= -\frac{Z_d e}{m_d} \partial_x \varphi, \\ \partial_x^2 \varphi &= 4\pi e (n_e - Z_d n_d - n_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – электростатический потенциал;  $x$  и  $t$  – пространственная (вдоль поверхности Луны) и временная переменные;  $n_\alpha$  ( $\alpha = e, i, d$ ) – концентрация электронов, ионов и пылевых частиц;  $m_d$ ,  $v_d$  – соответственно масса пылевой частицы и направленная скорость движения пылевых частиц.

Кроме того, необходимо учесть распределения ионов и электронов, которые успевают установиться на пылевых звуковых временных масштабах. Обычно рассматриваются распределения Больцмана для электронов и ионов. Однако пылевые звуковые солитоны

в рассматриваемых условиях индуцируют положительный электростатический потенциал [4], который представляет собой потенциальные стенки для электронов. Распределение Больцмана для электронов можно применять в случае, когда электроны не захватываются этими потенциальными стенками. Данное условие нарушается, если выполнено следующее неравенство [9]:

$$t_{\text{sol}} \gtrsim L_{\text{sol}}/v_{T_e}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{sol}}$  – характерное время формирования солитона,  $L_{\text{sol}}$  – ширина солитона,  $v_{T_e}$  – тепловая скорость электронов. Значение  $t_{\text{sol}}$  порядка  $\omega_{pd}^{-1}$  (где  $\omega_{pd}$  – пылевая плазменная частота), пространственный масштаб  $L_{\text{sol}}$  порядка дебаевского радиуса электронов  $\lambda_{De}$ . Таким образом,  $L_{\text{sol}}/v_{T_e} \sim \omega_{pe}^{-1}$  (где  $\omega_{pe}$  – плазменная частота электронов). Поэтому неравенство выполнено (2) практически всегда. В этом случае распределение электронов модифицируется благодаря адиабатическому захвату [9] и описывается формулой Гуревича:

$$\frac{n_e}{n_{e0}} = \exp\left(\frac{e\varphi}{T_e}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{e\varphi}{T_e}}\right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{e\varphi}{T_e}}, \quad (3)$$

где  $\operatorname{erfc}(\zeta) \equiv 1 - \operatorname{erf}(\zeta)$  – дополнительная функция ошибок. Первое слагаемое в (3) соответствует свободным электронам, тогда как захваченные электроны представлены вторым слагаемым. Для ионов подобного не происходит, и оказывается возможным считать распределение ионов больцмановским:

$$n_i = n_{i0} \exp\left(-\frac{e\varphi}{T_i}\right). \quad (4)$$

Здесь  $n_{\alpha 0}$  ( $\alpha = e, i, d$ ) – невозмущенная концентрация электронов, ионов и пылевых частиц;  $T_{e(i)}$  температура электронов (ионов). Система уравнений (1), (3), (4) позволяет исследовать пылевые звуковые солитоны и применима, когда характерная скорость описываемого ей процесса существенно больше, чем тепловая скорость пылевых частиц, и меньше тепловой скорости ионов.

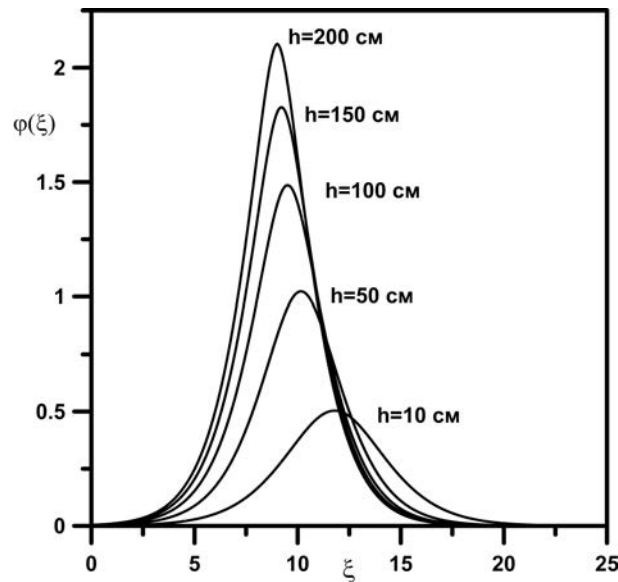


Рис. 2. Профили  $\varphi(\xi)$ , характеризующие пылевые звуковые солитоны на различных высотах  $h$  при  $\theta = 82^\circ$ ,  $M = 9$  и параметрах плазменно-пылевой системы, вычисленных при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.15 \text{ эВ}$

Основной вклад в слагаемые системы уравнений (1), содержащие параметры электронов, вносится фотоэлектронами. Расчеты производятся при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.15 \text{ эВ}$ . В свою очередь, параметры, содержащие параметры ионов, определяются характеристиками протонов солнечного ветра. При этом (ввиду малости концентрации протонов солнечного ветра по сравнению с концентрацией фотоэлектронов) роль ионов солнечного ветра при

формировании пылевых звуковых возмущений пренебрежимо мала. Поэтому ниже вкладом ионов пренебрегают. Кроме того, аналогично ситуации в запыленной мезосфере Земли (см., например, [10]) возможным оказывается пренебречь изменениями зарядов пылевых частиц в солитоне.

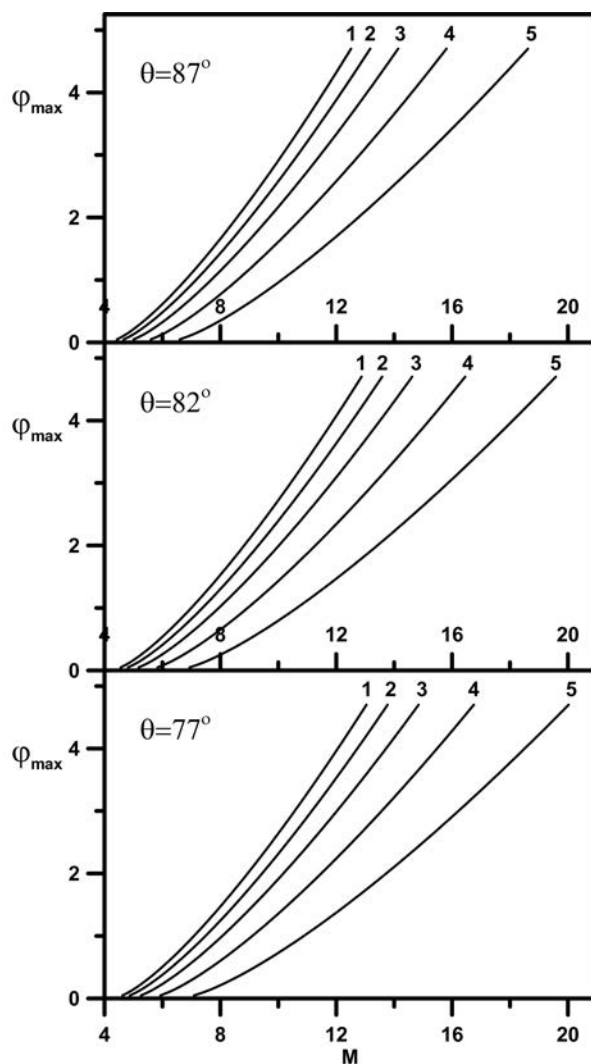


Рис. 3. Высота зависимости значений числа Маха  $M$  и амплитуды пылевого звукового солитона  $\varphi_{\max}$  при  $\theta = 87^\circ, 82^\circ, 77^\circ$  и параметрах плазменно-пылевой системы, вычисленных при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.15 \text{ эВ}$

Решения системы уравнений (1) ищутся в виде локализованного волнового возмущения, движущегося с постоянной скоростью  $M$  вдоль оси  $Ox$ . Таким образом, все параметры задачи должны зависеть от координаты  $x$  и времени  $t$  посредством только переменной  $\xi = x - Mt$ . Кроме того, предполагается, что все возмущения исчезают при  $\xi \rightarrow \pm\infty$ . Далее, используется стандартный подход, основанный на нахождении сагдеевского потенциала  $V(\varphi)$ . При этом систему уравнений (1) можно свести к уравнению, формально совпадающему с законом сохранения энергии:

$$\frac{1}{2}(\varphi_\xi)^2 + V(\varphi) = 0, \quad (5)$$

$$V(\varphi) = 1 - \exp(\varphi) \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\varphi}} \exp(-u^2) du \right) - \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \varphi^{3/2} -$$

$$-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\varphi} + |M|d \left( |M| - \sqrt{M^2 - 2Z_d\varphi} \right). \quad (6)$$

Здесь использованы безразмерные величины, полученные в соответствии с заменами  $e\varphi/T_e \rightarrow \varphi$ ;  $M/c_d \rightarrow M$ ;  $\xi/\lambda_{De0} \rightarrow \xi$ ;  $c_d = \sqrt{T_e/m_d}$ ,  $d = n_{d0}/n_{e0}$ ,  $\lambda_{De0} = \sqrt{T_e/4\pi n_{e0}e^2}$ ;  $Z_d > 0$ .

Для существования локализованных пылевых звуковых структур сагдеевский потенциал  $V(\varphi)$  должен иметь локальный максимум в точке  $\varphi = 0$ . Кроме того, у уравнения  $V(\varphi) = 0$  должно быть, по крайней мере, одно действительное решение  $\varphi_0 \neq 0$ . Локальный максимум сагдеевского потенциала  $V(\varphi) = 0$  в точке  $\varphi_0 \neq 0$  существует, если выполнено условие

$$M^2 > Z_d^2 d / (1 + Z_d d), \quad (7)$$

являющееся условием существования пылевых звуковых солитонов. Профили  $\varphi(\xi)$ , характеризующие пылевые звуковые солитоны на различных высотах  $h$  при  $\theta = 82^\circ$ ,  $M = 9$ , приведены на рис. 2. Отметим довольно большие амплитуды солитонов ( $\varphi \sim 2T_e/e \sim 0.3$  В). Следует иметь в виду, что в целом учет захваченных электронов (и, соответственно, использование формулы Гуревича вместо распределения Больцмана для электронов) увеличивает область определения возможных чисел Маха в сторону больших их значений и приводит к несколько большим возможным амплитудам солитонов, чем в ситуации, когда распределение электронов описывается формулой Больцмана [4].

На рис. 3 изображены высотные зависимости значений числа Маха  $M$  и амплитуды пылевого звукового солитона  $\varphi_{\max}$  для разных значений угла  $\theta$ . Данные, приведенные на рис. 2 и 3, получены для параметров плазменно-пылевой системы, вычисленных при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 0.15$  эВ (см. рис. 1).

#### 4. Заключение

В работе представлено описание плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Луны, которая включает в себя фотоэлектроны, электроны и ионы солнечного ветра, а также заряженные пылевые частицы. Обсуждаются пылевые звуковые солитоны в приповерхностной лунной плазме. Показано, что при их рассмотрении следует учитывать эффект захвата электронов потенциальными стенками, существование которых обусловлено положительным электростатическим потенциалом солитона. Определены области возможных чисел Маха и амплитуд солитонов. Найдены солитонные решения для различных высот над лунной поверхностью. Показано, что солитоны у поверхности Луны могут обладать довольно большими амплитудами (порядка 0.3 В). Солитоны в приповерхностном слое освещенной части Луны (или те, или иные их проявления) могут быть зафиксированы с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций «Луна-25» и «Луна-27». Так, в состав выносных датчиков на станции «Луна-27», входит зонд Ленгмюра, с помощью которого возможны локальные измерения флуктуаций концентрации и потенциала в плазме. С другой стороны, возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра и интерпретации данных наблюдений.

---

Работа выполнена по теме «Плазма» ИКИ РАН. Т. И. Морозова выражает благодарность Фонду развития теоретической физики «Базис».

#### Литература

1. Zook H. A., McCoy J. E. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18, N 11. P. 2117–2120.

2. *Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z.* A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // *Nature*. 2015. V. 522, N 7556. P. 324–326.
3. *Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu.N.* Dusty plasma at the surface of the Moon // *Solar Syst. Res.* 2013. V. 47, N 6. P. 419–429.
4. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I.* Wave processes in dusty plasma near the Moon's surface // *Plasma Phys. Rep.* 2015. V. 41, N 10. P. 799–807.
5. *Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu.N., Afonin V.V., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Lisin E.A., Petrov O.F.* On the distributions of photoelectrons over the illuminated part of the Moon // *JETP Lett.* 2014. V. 99, N 3. P. 115–120.
6. *Walbridge E.* Lunar photoelectron layer // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, N 19. P. 3668–3687.
7. *Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B.* Photoemission and secondary electron emission from lunar surface material // *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*. Dordrecht: Reidel, 1973. P. 389–401.
8. *Rao N.N., Shukla P.K., Yu M.Y.* Dust-acoustic waves in dusty plasmas // *Planet. Space Sci.* 1990. V. 38, N 4. P. 543–546.
9. *Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P.* *Physical Kinetics*. Oxford: Pergamon Press, 1981. P. 146–149.
10. *Popel S.I., Kopnin S.I., Kosarev I.N., Yu M.Y.* Solitons in Earth's dusty mesosphere // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37, N 2. P. 414–419.

## References

1. *Zook H.A., McCoy J.E.* Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18, N 11. P. 2117–2120.
2. *Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z.* A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon. *Nature*. 2015. V. 522, N 7556. P. 324–326.
3. *Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu.N.* Dusty plasma at the surface of the Moon. *Solar Syst. Res.* 2013. V. 47, N 6. P. 419–429.
4. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I.* Wave processes in dusty plasma near the Moon's surface. *Plasma Phys. Rep.* 2015. V. 41, N 10. P. 799–807.
5. *Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu.N., Afonin V.V., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Lisin E.A., Petrov O.F.* On the distributions of photoelectrons over the illuminated part of the Moon. *JETP Lett.* 2014. V. 99, N 3. P. 115–120.
6. *Walbridge E.* Lunar photoelectron layer. *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, N 19. P. 3668–3687.
7. *Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B.* Photoemission and secondary electron emission from lunar surface material. *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*. Dordrecht: Reidel, 1973. P. 389–401.
8. *Rao N.N., Shukla P.K., Yu M.Y.* Dust-acoustic waves in dusty plasmas. *Planet. Space Sci.* 1990. V. 38, N 4. P. 543–546.
9. *Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P.* *Physical Kinetics*. Oxford: Pergamon Press, 1981. P. 146–149.
10. *Popel S.I., Kopnin S.I., Kosarev I.N., Yu M.Y.* Solitons in Earth's dusty mesosphere. *Adv. Space Res.* 2006. V. 37, N 2. P. 414–419.