

# ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ЗАРЯДОВО-ПОЛЕВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ В ЗАДАЧЕ О ВЕРТИКАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ У ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Яковлев А.Б.

Санкт-Петербургский государственный университет

andy\_yakovlev@rambler.ru

## 1. Введение

Интерес к проблеме подъема лунной пыли первоначально возник в связи с интерпретацией фотографий и рисунков астронавтов, сделанных при проведении полета космического аппарата «Аполлон 17» (см. рис. 1). Проведенный в [1] анализ позволил определить, что такая картина свечения более всего соответствует рассеиванию света субмикронными частицами с экспоненциально убывающей по высоте плотностью. К настоящему времени предложено несколько моделей подъема пыли с поверхности Луны, объединяемых общим предположением об электростатическом характере этого процесса [2-7]. Например, в [2] указано на возможность левитации микрочастиц лунного грунта в сильных электрических полях, индуцированных в результате дифференциальной зарядки освещенных и затененных участков лунной поверхности в районе терминатора.

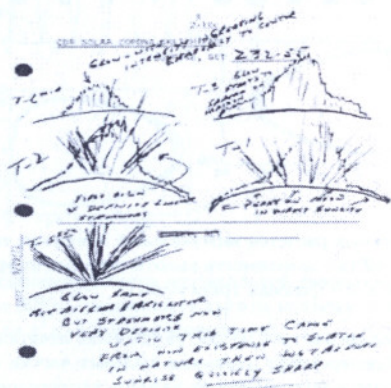


Рис. 1. Изображение лунного свечения.

При взаимодействии поверхности безатмосферного небесного тела, такого как Луна, с солнечным ветром и излучением Солнца освещенная часть поверхности тела приобретает электрический заряд (обычно положительный) [8] и образуется приповерхностный фотоэлектронный слой. Проблеме изучения структуры указанного электронного слоя посвящены работы [8-13]. Первоначально рассматривался монотонный характер изменения потенциала внутри фотоэлектронного слоя с высотой [8-10], однако в [11, 12] показано, что

© Яковлев А.Б.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 06-01-00703-а)

более вероятным является немонотонное распределение электростатического потенциала над эмитирующей поверхностью, подвергающейся воздействию потока тепловых фотоэлектронов и моноскоростного потока ионов. Это утверждение подтверждают, в частности, результаты спутниковых измерений [13]. В работах [11, 14-16] описаны методики определения параметров немонотонного потенциала около лунной поверхности и расчета величины электрического заряда, наводимого на микрочастице лунного реголита в приповерхностном фотоэлектронном слое. Так как пространственные и скоростные переменные интегрирования в выражениях для потоков электронов на микрочастицу не разделяются, скорость изменения ее электрического заряда может быть определена только численно. Выражения для потоков существенно упрощаются если плотность фотоэлектронов существенно превосходит плотность тепловых фотоэлектронов. Такое соотношение будет реализовано, если в соответствии с гипотезой, высказанной в [8, 17] предположить, что лунная поверхность покрыта монослоем соединений водорода, а наличие такого монослоя приводит к существенному увеличению выхода фотоэлектронов. Указанная гипотеза подтверждается экспериментальными данными, приведенными в [18].

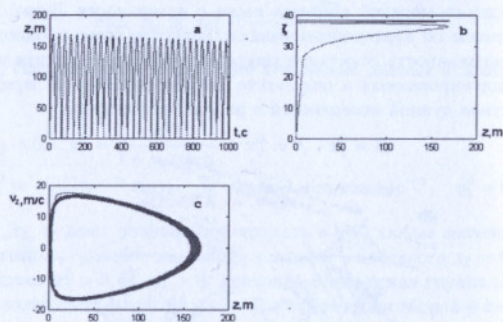


Рис. 2. Результаты численных расчетов вертикальной динамики частиц лунного реголита при  $R=0.007$  мкм и  $\theta_0 = 80^\circ$  (а – зависимость высоты подъема от времени, б – зависимость безразмерного заряда от  $z$ , с – фазовая траектория).

В работах [19-22] нами рассмотрен вопрос об условиях левитации лунной пыли и проведено компьютерное моделирование динамики пылевых частиц в области лунного терминатора. Установлено, что в зависимости от размера частицы реализуется один из трех различных режимов движения, соответствующий совместному изменению высоты подъема частицы и величины наводимого на ее поверхности электрического заряда (см. рисунки 2-4) [22]. Рисунок 2 иллюстрирует случай наиболее мелких частиц, для которых характерно начиная с некоторого момента времени постоянство электрического заряда. В этом случае динамика наиболее простая. На рисунке 3 показана временная эволюция для частиц средних размеров. Как показано в [23] наблюдаемое в этом случае затухание колебаний вызвано запаздыванием величины наведенного на частице заряда относительно равновесного значения, соответствующего данной высоте. Временная эволюция для более крупных из способных левитировать частиц представлена на рисунке 4. Характерной особенностью для этого случая является квазистационарность электрического заряда частицы.

В данном случае если не учитывать слабое межпланетное магнитное поле, электромаг-

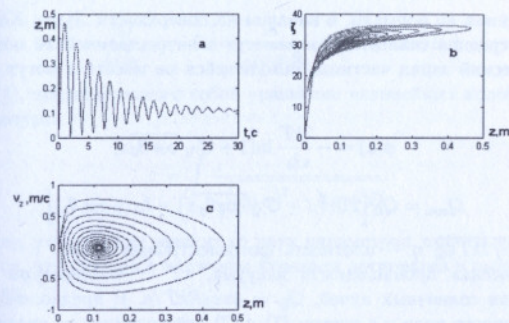


Рис. 3. Результаты численных расчетов вертикальной динамики частиц лунного реголита при  $R=0.1$  мкм и  $\theta_0 = 80^\circ$  (а – зависимость высоты подъема от времени, б – зависимость безразмерного заряда от  $z$ , с – фазовая траектория).

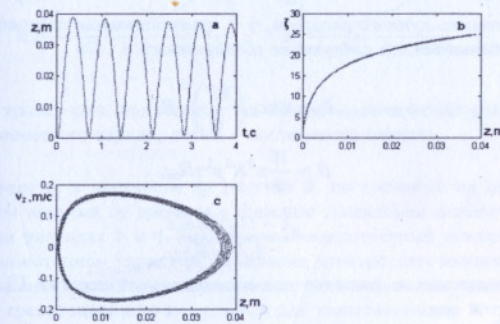


Рис. 4. Результаты численных расчетов вертикальной динамики частиц лунного реголита при  $R=0.23$  мкм и  $\theta_0 = 80^\circ$  (а – зависимость высоты подъема от времени, б – зависимость безразмерного заряда от  $z$ , с – фазовая траектория).

нитное поле удовлетворяет условиям существования обобщенных потенциалов: а именно заряд – квазистационарный и напряженность электрического поля параллельна градиенту электрического заряда [24]. Это позволяет записать гамильтониан задачи и провести ее аналитическое рассмотрение.

## 2. Постановка задачи и основные результаты

Как и в предыдущих работах [19-22] будем предполагать, что 1) монослоем соединений водорода покрыта как сама лунная поверхность, так и поверхность рассматриваемых частиц грунта, 2) частицы лунного реголита – проводящие и имеют сферическую форму, 3) радиус частиц  $R$  много меньше характерного вертикального масштаба фотоэлектронного слоя. Введем прямоугольную декартову систему координат с вертикальной

осью  $z$ , направленной по нормали, и началом на поверхности Луны. Как показано в [14, 19] для условий средней солнечной активности электростатический потенциал и равновесный электрический заряд частицы, находящейся на высоте  $z$  могут быть записаны в следующем виде

$$\phi(z) = -\frac{2kT}{e} \ln(1 + G\sqrt{\cos\theta_0}z) \quad (1)$$

$$Q_{\text{equ}} = Q_0 \left[ 2 \ln(1 + G\sqrt{\cos\theta_0}z) - \ln(4 \cos\theta_0) \right] \quad (2)$$

где  $G = e\sqrt{n/2kT\varepsilon_0}$ ,  $n$  — плотность фотоэлектронного слоя,  $e$  — заряд электрона,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $kT$  — температура фотоэлектронов,  $\theta_0$  — угол падения солнечных лучей,  $Q_0 = 4\pi\varepsilon_0 RkT/e$ . В предположении об однородности гравитационного поля и с учетом (1) и (2) действующая на частицу вертикальная сила имеет вид

$$F(z) = 8\pi\varepsilon_0 \left(\frac{kT}{e}\right)^2 R \cdot \ln \left[ \frac{(1 + G\sqrt{\cos\theta_0}z)^2}{4 \cos\theta_0} \right] \cdot \frac{G\sqrt{\cos\theta_0}}{1 + G\sqrt{\cos\theta_0}z} - \frac{16}{9} \pi^2 R^3 \rho^2 \gamma R_m.$$

Здесь  $\rho$  — плотность лунного реголита,  $\gamma$  — гравитационная постоянная,  $R_m$  — радиус Луны. Для упрощения введем следующие обозначения:

$$I_0 = 8\pi\varepsilon_0 \left(\frac{kT}{e}\right)^2 R,$$

$$\beta = \frac{16}{9} \pi^2 R^3 \rho^2 \gamma R_m,$$

$$\alpha = \frac{1 + G\sqrt{\cos\theta_0}z}{2\sqrt{\cos\theta_0}}.$$

В новых обозначениях выражение для потенциальной энергии  $U(z) = -\int_0^z F(z')dz'$  имеет очень простой вид

$$U(\alpha) = -I_0 (\ln \alpha)^2 + I_0 \left( \ln \sqrt{4 \cos\theta_0} \right)^2 + \beta \left( \frac{2}{G} \alpha - \frac{1}{G\sqrt{\cos\theta_0}} \right),$$

который позволяет, используя постоянство функции Гамильтона, получить выражение для безразмерной «скорости»  $\dot{\alpha}$

$$\dot{\alpha}^2 = \frac{G^2}{2m} \left[ E + I_0 (\ln \alpha)^2 - I_0 \left( \ln \sqrt{4 \cos\theta_0} \right)^2 - \frac{2\beta}{G} \alpha + \frac{\beta}{G\sqrt{\cos\theta_0}} \right],$$

где  $m$  — масса частицы,  $E$  — величина полной энергии.

Для рассмотренного в [22] случая отрыва частицы от поверхности Луны с нулевой скоростью энергия  $E = 0$  и

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 = \frac{G^2}{2m} \left[ I_0 (\ln \alpha)^2 - I_0 \left( \ln \sqrt{4 \cos\theta_0} \right)^2 - \frac{2\beta}{G} \alpha + \frac{\beta}{G\sqrt{\cos\theta_0}} \right]. \quad (3)$$

Введя безразмерное время  $\tau = \sqrt{\frac{G^2 I_0}{2m}} t$ , получим из (3)

$$\left(\frac{d\alpha}{d\tau}\right)^2 = (\ln \alpha)^2 - A\alpha + B, \quad (4)$$

где

$$A = \frac{2\beta}{G I_0}, \quad B = \frac{A}{2\sqrt{\cos\theta_0}} - \left( \ln \sqrt{4 \cos\theta_0} \right)^2.$$

Уравнение (4), представляющее собой уравнение нелинейных колебаний, может быть решено в квадратурах

$$\tau = \int \frac{d\alpha}{\sqrt{(\ln \alpha)^2 - A\alpha + B}}. \quad (5)$$

Хорошо видно, что решение зависит от двух параметров, причем уменьшить их количество не удастся, что связано с наличием квадрата логарифма в выражении для потенциальной энергии.

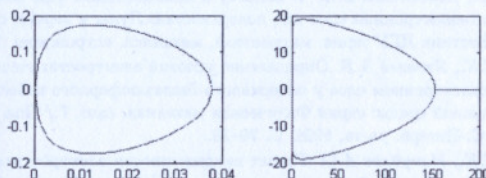


Рис. 5. Фазовые траектории, полученные на основе аналитических решений (правый для случая квазиравновесного заряда, левый — постоянного заряда).

Как можно видеть, в частности на рисунке 5, построенные на основе (4) и (5) зависимости высоты подъема от времени и фазовые траектории полностью соответствуют изображенным на рисунках 2 и 4. Проведенный качественный анализ позволяет утверждать, что при монотонном характере изменения электростатического потенциала с высотой принципиальный характер движения остается таким же как в рассмотренном случае для постоянного гравитационного поля, так и для ньютоновского.

## 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] De B.R., Criswell D.R. Intense localized photoelectric charging in the lunar sunset terminator region. // J. of Geophys. Res. 1977. V. 82. N. 7. P. 990–1007.
- [3] Whipple E.C. Potential of surfaces in space. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 1197–1250.
- [4] Horanyi M., Walch B., Robertson S., Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust. // J. of Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 8575–8580.
- [5] Borisov N., Mall U. Charging and motion of dust grains near the terminator of the moon. // Planetary and space science. 2006. V. 54. P. 572–580.
- [6] Stubbs T.J., Vondrac R.R., Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust. // Advances in space research. 2006. V. 37. P. 59–66.
- [7] Horanyi M. Lunar dust: erosion and transport. // Bull. Amer. Astron. Soc. 1990. V. 22. N. 3. P. 1056.
- [8] Walbridge E.W. The lunar photoelectron layer. // J. of Geophysical research. 1973. V. 78. N. 19. P. 3668–3687.

- [9] *Freeman I.W., Ibrahim M.* Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheaths. // *Moon*. 1975. V. 14. N. 1. P. 103–114.
- [10] *Singer S.F., Walker E.H.* Photoelectric screening of bordies in interplanetary space. // *Icarus*. 1962. V. 1. N. 1. P. 7–12.
- [11] *Guertsey R.L., Fu J.H.* Potential distribution surrounding a photoemission plate in a dilute plasma. // *J. of Geophys. Res.* 1970. V. 75. N. 16. P. 3193–3199.
- [12] *Филиппов Б. В.* Аэродинамика тел в верхних слоях атмосферы. Л.: Изд-во. Ленингр. ун-та, 1973. 126 с.
- [13] *Whipple E.C.* Theory of a spherically symmetric photoelectrons sheath. // *J. of Geophys. Res.* 1976. V. 81. N. 4. P. 601–607.
- [14] *Мануйлов А.С., Колесников Е.К.* Кинетика фотоэлектронного слоя у поверхности безатмосферного небесного тела. // *Физическая механика* вып. 5 / Под ред. Б.В. Филиппова. СПб.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. С. 110–125.
- [15] *Мануйлов А.С., Колесников Е.К.* К вопросу о немонотонном ходе электростатического потенциала в фотоэлектронном слое над поверхностью Луны в период средней солнечной активности. // *Вестник ЛГУ* серия: математика, механика, астрономия. 1984. В. 7. С. 101–104.
- [16] *Колесников Е.К., Яковлев А.Б.* Определение условий электростатической левитации микрочастиц в фотоэлектронном слое у поверхности безатмосферного небесного тела. // *Модели механики сплошной среды: серия Физическая механика*. вып. 7 / Под ред. Б.В. Филиппова. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1998. С. 70–79.
- [17] *Колесников Е.К., Мануйлов А.С.* Расчет напряженности электростатического поля над поверхностью Луны, покрытой монослоем водорода. // *Астрономический журнал*. 1982. Т. 59. В. 5. С. 996–998.
- [18] *Leich D.A., Tombrello T.A.* Trapped solar hydrogen in lunar samples. // *Lunar Science*. 1974. V. 5. P. 444–446.
- [19] *Колесников Е.К., Яковлев А.Б.* Условие электростатической левитации микрочастиц лунного реголита. // *Астрономический вестник*. 1997. Т. 31. №. 1. С. 70–71.
- [20] *Яковлев А.Б.* Динамика левитирующих микрочастиц лунного реголита. *Астрономический вестник* // 1998. Т. 32. №. 4. С. 398–400.
- [21] *Колесников Е.К., Яковлев А.Б.* Возможные режимы колебательного движения микрочастиц лунного реголита в электростатическом поле приповерхностного фотоэлектронного слоя. // *Труды 15 сессии международной школы по моделям механики сплошной среды*. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001. С. 46–55.
- [22] *Kolesnikov E.K., Yakovlev A.B.* Vertical dynamics and horizontal transfer of submicron-sized lunar-regolith microparticles levitating in the electrostatic field of the near-surface photoelectron layer. // *Planetary and Space Science*. 2003. V. 51. P. 879–885.
- [23] *Яковлев А.Б.* Особенности движения пылевых частиц в приповерхностном плазменном слое безатмосферного небесного тела. *Нелинейный динамический анализ – 2007. Тезисы докладов международного конгресса*, Санкт-Петербург, 4–8 июня 2007. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. С. 206.
- [24] *Колесников Е.К., Чернов С.В., Яковлев А.Б.* О корректности канонической формулировки задачи движения субмикронных частиц в плазмосфере Земли. // *Космические исследования*. 2007. Т. 45. №. 6. С. 499–504.