

**Кенжебекова А.И., Коданова С.К.**

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,  
Казахстан, г. Алматы, e-mail: kenzhebekova.a@kaznu.kz

## **О ЛЕВИТАЦИИ ПЫЛИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЛУНЫ**

Определение механизмов образования лунной пыли, исследование динамики и взаимодействия пылинок с плазмой и с поверхностью космических аппаратов являются актуальными, при этом существуют несколько теоретических моделей по исследованию формирования плазменно-пылевого слоя над поверхностью Луны.

В статье представлен краткий обзор исследований, изучавшие динамику пылевых частиц в плазменном слое над поверхностью Луны. Построена вычислительная модель динамики пылевых частиц левитирующих над поверхностью Луны на основе метода молекулярной динамики. Определено распределение пылевых частиц по размерам. Рассматриваются физические условия – плотность реголита, размеры частиц, параметры (плотность, температура электронов и ионов, скорость) солнечного ветра, характеризующие динамику пылевых частиц вблизи поверхности Луны. Зарядка пылевых частиц рассчитывалась с учетом плотности электронов, ионов солнечного ветра и фотоэлектронов в приближении ограниченных орбит (OML). Построен график зависимости заряда пылевой частицы от времени. Процессы зарядки пылевых частиц в плазменной среде вблизи поверхности Луны могут привести к левитации и транспортировке пылевых частиц по поверхности Луны под действием гравитационного и электрического поля.

**Ключевые слова:** Лунный реголит, плазменно-пылевой слой, левитация.

Kenzhebekova A.I., Kodanova S.K.

Al-Farabi Kazakh National University,  
Kazakhstan, Almaty, e-mail: kenzhebekova.a@kaznu.kz

### **Dust levitation over the moon surface**

Determining the mechanisms of formation of lunar dust, the study of the dynamics and interaction of dust particles with plasma and with the surface of spacecraft are relevant, while there are several theoretical models for studying the formation of a plasma-dust sheath above the surface of the moon.

The article presents a brief review of studies that have investigated the dynamics of dust particles in the plasma sheath above the lunar surface. A computational model of the dynamics of dust particles levitating above the surface of the moon was created on the basis of the molecular dynamics simulations. The distribution of the dust particle size has been determined. We consider the physical conditions such as – the density of the regolith, particle size, parameters (density, temperature of electrons and ions, velocity) of the solar wind, which characterize the dynamics of dust particles near the lunar surface. Charging of dust particles was calculated taking into account the density of electrons, solar wind ions and photoelectrons in the orbital motion limited. The graph of the dust particle charge versus time is plotted. The processes of charging dust particles in a plasma medium near the surface of the moon can lead to levitation and the transport of dust particles across the surface of the moon under the influence of a gravitational and electric fields.

**Key words:** lunar regolith, plasma-dust layer, levitation.

Кенжебекова А.И., Коданова С.К.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,  
Қазақстан, Алматы қ., e-mail: kenzhebekova.a@kaznu.kz

### Ай бетіндегі тозаңды бөлшектің левитациясы жөнінде

Ай бетіндегі тозаңның түзілу механизмі, оның динамикасы мен плазма және ғарыштық аппараттардың бетімен әсерлесуі өзекті болып табылады, сондықтан Ай бетіндегі плазмалық-тозаңдық қабатты зерттеуге байланысты бірнеше теориялық модельдер бар.

Осы мақалада Ай бетінің плазмалық қабатындағы тозаңдық бөлшектердің динамикасын оқып үйренуге арналған зерттеу жұмыстарына қысқаша шолу жасалынған. Молекулалық динамика әдісі негізінде Ай бетінде левитацияланатын тозаңды бөлшектердің динамикасын есептейтін модель құрылды. Тозаңды бөлшектердің өлшемдері бойынша таралуы алынды. Ай бетінің маңайындағы тозаңды бөлшектердің динамикасын сипаттауға қажет күн желінің параметрлері (тығыздық, электрондар мен иондардың температурасы, жылдамдық), реголит тығыздығы, тозаңды бөлшектің өлшемі сияқты физикалық шарттар қарастырылады. Тозаңды бөлшектердің зарядталуы күн желіндегі электрондар мен иондардың тығыздығын, фотоэлектрондардың тығыздығын ескереу арқылы шектелген орбиталар жуықтауы (OML) бойынша есептелді. Ә түрлі радиустағы тозаңды бөлшектердің зарядының уақыт бойынша тәуелділігі тұрғызылды. Ай бетінің маңайындағы плазмалық ортаның тозаңды бөлшектерінің зарядталуы гравитациялық және электр өрістерінің әсерінен тозаңды бөлшектердің Ай бетінде левитациялануын және тасымалдануын туғызады.

**Түйін сөздер:** Ай реголиті, плазма-тозаңдық қабат, левитация.

### Введение

Плазменно-пылевые облака, левитирующие над поверхностью Луны состоят из заряженных микрочастиц и поднимаются на высоту до десятки километров [1]. Основным источником пыли на Луне является порошок реголит, покрывающий ее поверхность слоем толщиной от нескольких сантиметров, до нескольких метров в районах лунных морей. Химический состав образцов реголита из разных областей Луны, доставленных на Землю, приведен в [1]. Плотность материала реголита, состоящего из различных окислов (алюминия, кремния, железа и др.), находится в диапазоне от 1,3 до 3,1 г/см<sup>3</sup>, средний размер частиц реголита был 70-100 мкм. Образование плазменно-пылевого слоя на поверхности Луны объясняется влиянием ударов метеоритов о ее поверхность [2, 3] и воздействием плазмы солнечного ветра [4, 5].

В эксперименте [6] рассматривается аналогия с процессами, возникающими вследствие бомбардировки микрометеоритами поверхности Луны и последующим разлетом пыли. Левитирующее облако микрочастиц создается путем воздействия на порошок гиротронного излучения мощностью до 500 кВт. Были оценены параметры электрического поля для формирования плазменного слоя.

Солнечным ветром называют поток ионизированных частиц, выбрасываемых из верхних

слоев атмосферы Солнца. В [7] приведены параметры быстрого и солнечного ветра Средняя скорость солнечного ветра составляет 400 км/с, плотность потока ионов и электронов 8.7 см<sup>-3</sup>, температура электронов 12 эВ, температура ионов 6 эВ. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны заряжается положительно на дневной стороне, отрицательно на ночной. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны поглощая фотонов, электроны и ионы солнечного ветра приобретают положительный заряд. Эти процессы приводят к подъему и движению пыли, и они могут левитировать над поверхностью Луны, образуя плазменно-пылевой слой. Плотность пылевых частиц в таком слое по данным измерений, проведенных LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer), составила около 10<sup>-8</sup> см<sup>-3</sup> [8].

Динамика пыли под влиянием солнечного ветра исследуется во многих работах, особенно вблизи поверхностей Луны. Criswell и De [9, 10] исследовали электростатическую среду вблизи терминатора Луны, используя численную модель для расчета электрического поля. По их результатам электрическое поле терминатора может достигать 1000 В/см [9].

Colwell с соавторами изучили левитацию пыли над поверхностью Луны [11, 12]. Перенос заряженной пылинки над дневной поверхностью Луны моделируется путем расчета

траекторий заряженных пылевых частиц, учитывая гравитационные и электростатические силы.

Nitter и др. [13-15] приводят вывод предложенной модели о плазменной среде вблизи поверхности безатмосферных тел. Они представляют достаточные условия для существования стабильного и нестабильного плазменно-пылевого слоя в освещенной части Луны. Исследованы динамические свойства частиц пыли, такие как затухания колебаний, устойчивость и захват. Мелкие частицы получив ускорения могут покидать Луну и стать источником пыли в солнечной системе. Некоторые частицы могут отразиться обратно и совершать колебания. Это способствует перераспределению поверхностных пылевых частиц.

Porre и Horganу [16, 17] использовали метод частиц в ячейке (PIC) для изучения плазменного слоя вблизи поверхности Луны с учетом немасвелловость функции распределения фотоэлектронов. Кроме того, в этой модели пылевые частицы поднимались, за счет постоянной силы тяжести и учитывают изменения заряда частицы со временем.

В [18] построена динамическая модель «фонтана» пылевых частиц левитирующих над лунной поверхностью. Было определено, что частицы размерами 0,01–0,1 мкм могут подниматься до 0,1–100 км в зоне терминатора. Рассмотрены случаи на дневной и ночной стороне Луны.

В работах С.И. Поппеля и с коллегами [19, 20] представлена самосогласованная теоретическая модель, которая рассчитывает распределения концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц, расположенных над освещенной частью поверхности Луны. В модели, заряда пылевых частиц над поверхностью Луны рассчитывается с учетом влияния электронов, ионов солнечного ветра и фотоэлектронов как от лунной поверхности, так от поверхностей пылевых частиц. Для напряженности электрического поля используется аналитическое выражения и распределения пылевых частиц над Луной по размерам.

### Постановка задачи

В настоящей работе рассмотрена задача расчета разлета слоя пылевых частиц, на основе метода молекулярной динамики [21]. Пространство разбивается на прямоугольные ячейки

объемом  $V$  с  $N$  пылевыми частицами в каждой.

Длина ребра ячейки  $L = (N/n_d)^{1/3}$  где  $n_d$  – плотность пылевых частиц. На базовую ячейку и на ее реплики по осям  $x$  и  $y$  были наложены периодические граничные условия. Начальное распределение координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  берется равномерным в слое вблизи поверхности Луны, компоненты скоростей приравниваем к нулю, т.е. пылевые частицы неподвижны.

Рассматривается динамика  $N$  пылевых частиц разного диаметра, размеры которых имеют заданную функцию распределения  $f(R_{dust})$ :

$$f(R_{dust}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(R_{dust} - \langle R_{dust} \rangle)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $R_{dust}$  – радиус пылевой частицы,  $\langle R_{dust} \rangle$  – средний размер пылевых частиц,  $\sigma$  – дисперсия.

На рисунке 1 представлена гистограмма распределения пылевых частиц по размерам, средний радиус частиц равен 50 мкм, дисперсия составляла 10 мкм.

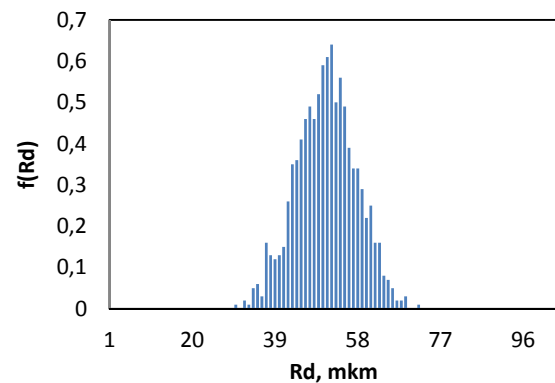


Рисунок 1 – Распределение пылевых частиц по размерам

Пылевые частицы находясь во внешнем электрическом поле  $\vec{E}$  и гравитационном поле взаимодействует между собой. Уравнение движения пылевой частицы записывается следующим образом:

$$m_d \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} = \frac{Q_{di} Q_{dj}}{r_{ij}^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j) + m_d \vec{g}_M + Q_d \vec{E}, \quad (2)$$

где  $m_d$  – масса пылевой частицы,  $Q_i$  и  $Q_j$  – заряды взаимодействующих пылевых частиц,  $\vec{r}_i$  – положение частиц в момент времени  $t$ ,  $r_{ij}$  – расстояние между пылевыми частицами,  $g_M = 1.66 \text{ см/с}^2$  – ускорение свободного падения для Луны. Масса частицы пропорциональна ее радиусу  $m_d = \frac{4}{3}\pi\rho R_d^3$ , где  $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$  – плотность реголита.

Изменение заряда пылевой частицы описывается уравнением баланса тока:

$$\frac{\partial Q_d}{\partial t} = I_e + I_i + I_{ph,e} - I_{ph}, \quad (3)$$

где  $I_e$  – электронный ток солнечного ветра,  $I_i$  – ионный ток солнечного ветра,  $I_{ph,e}$  – ток фотоэлектронов, выбитых фотонами,  $I_{ph}$  – ток фотоэлектронов на пылевую частицу [20]. Эти токи зависят от свойств плазмы, а также характеристик пылевой частицы (размер, скорость, состав).

$$I_e = -\pi R_d^2 en_e \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{R_d T_e}\right), \quad (4)$$

$$I_i = \pi R_d^2 en_i \sqrt{\frac{T_i}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left\{ \frac{u_i + u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i - u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) + \frac{u_i - u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i + u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) \right\} + \pi R_d^2 en_i \sqrt{\frac{T_i}{4m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{u_i + u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{u_i - u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) \right\} \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{R_d T_i} + \frac{u_i^2}{u_{Ti}^2}\right), \quad (5)$$

$$I_{ph} \approx -\pi R_d^2 e N_0 \sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{R_d T_{e,ph}}\right) \exp\left(-\frac{Z_d e^2}{R_d T_{e,ph}}\right), \quad (6)$$

$$I_{e,ph} \approx -\pi R_d^2 en_{e,ph} \sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{R_d T_{e,ph}}\right), \quad (7)$$

где  $Z_{dust}$  – зарядовое число,  $n_e$ ,  $n_i$  – плотность электронов и ионов солнечного ветра соответственно,  $T_e$ ,  $T_i$  – температура электронов и ионов солнечного ветра соответственно,  $m_e$ ,  $m_i$  – масса электронов и ионов,  $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2 / am_i}$ ,  $u_{Ti}$  – тепловая скорость ионов солнечного ветра,  $u_i$  – скорость солнечного ветра.

Исследуя процессы зарядки пылевых частиц, можно получить информацию о заряде и потенциале взаимодействия пылевых частиц, которая необходима для описания динамических явлений в пылевой плазме [22-25].

На рисунке 2 представлен график распределения заряда по времени для разного размера пылинки. Электрический заряд пылинки, в свою очередь изменит поток поглощаемых частиц плазмы и в конечном итоге приведет к

равновесному состоянию, когда полный электрический ток, полученный плазменными частицами, равен нулю.

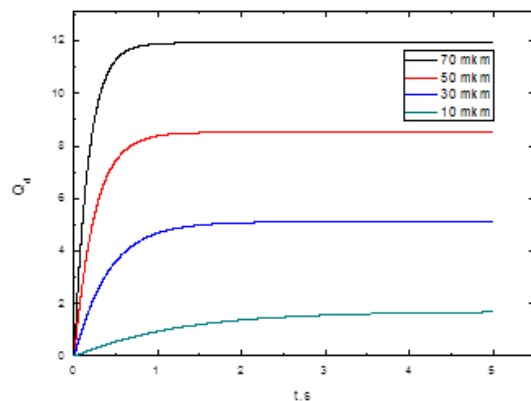


Рисунок 2 – Распределения заряда по времени для разного размера пылинки

## Заключение

Проведен расчет распределения заряда пылевых частиц на поверхности Луны под влиянием солнечного ветра. В дневной части Луны пылинки, приобретая достаточного положительного заряда, смогут преодолеть гравита-

ционную силу и может привести к левитации над Луной.

В отсутствие фотоэмиссии, т.е. в затененной части Луны, заряд пылевой частицы становится отрицательным, вследствие более высокой подвижности электронов по отношению к ионам.

## Литература

- 1 Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. – М.: Академия Наук СССР Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 1975. – С. 1-50.
- 2 Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораны М. Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны // Письма в ЖЭТФ – 2017.- Т. 105. – С. 594-599.
- 3 M. Horanyi, J.R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grun, R. Srama, Z. Sternovsky. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // Nature – 2015. – Vol. 522. – P. 324-326.
- 4 Лисин Е.А., Тараканов В.П., Петров О.Ф., Попель С.И., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Фортгов В.Е. Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – том 98. – вып. 11. – С. 755 – 761.
- 5 Wang X., Horanyi M. and Robertson S. Investigation of dust transport on the lunar surface in a laboratory plasma with an electron beam // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol.115(A11). – A11102. <https://doi.org/10.1029/2010JA015465>.
- 6 Скворцова Н.Н., Майоров С.А., Малахова Д.В., Степашина В.Д., Образцова Е.А., Кенжебекова А.И., Шишилов О.Н. О пылевых структурах и цепных реакциях, возникающих над реголитом при воздействии излучения гиротрона // Письма в ЖЭТФ. – 2019. – Т.109(7). С.452 – 459. <https://doi.org/10.1134/S0370274X1907004X>.
- 7 Stubbs T. J., Halekas J.S., Farrell W. M. and Vondrak R. Lunar surface charging: a global perspective using lunar prospector data // Workshop on dust in planetary systems (Kaua'i, Hawai'i, September 26–30,2005). P.139-140.
- 8 Elphic R.C., Delory G.T., Hine B. P. et al. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission // Space Sci. Rev. – 2014. – Vol. 185. – P. 128.
- 9 De B.R., Criswell D.R. Intense localized photoelectric charging in the lunar sunset terminator region 1. Development of Potentials and Fields // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82(7). – P. 999-1004.
- 10 De B.R., Criswell D.R. Intense localized photoelectric charging in the lunar sunset terminator region 2. Supercharging at the progression of Sunset // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol.82(7). – P. 1005-1007.
- 11 Colwell J.E., Batiste S., Horanyi M., Robertson S. and Sture S. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45. – RG2006.
- 12 Colwell J.E., Gulbis A., Horanyi M., Robertson S. Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on Eros // Icarus. – 2005. – Vol. 175(1). – P. 159-169.
- 13 Nitter T., Havnes O., Melandso F. Levitation and dynamics of charged dust in the photoelectron sheath above surfaces in space // J. of Geophysical Research atmospheres. – 1998. – Vol. 103(A4). – P. 6605-6620.
- 14 Nitter T., Havnes O. Dynamics of dust in a plasma sheath and injection of dust into the plasma sheath above Moon and asteroidal surfaces // Earth Moon and Planets. – 1992. -Vol. 56(1). – P. 7-34.
- 15 Nitter T., Aslaksen T.K., Melandso F., Havnes O. Levitation and dynamics of a collection of dust particles in a fully ionized plasma sheath // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1994. – Vol. 22(2). – P. 159–172.
- 16 Poppe A., Horanyi M. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol.115. – A08106.
- 17 Horanyi M. Charged dust dynamics in the solar system // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 1996. Vol. 34. – P. 383–418.
- 18 Stubbs T.J., Vondrak R.R. and Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust // Adv.Space Res. – 2006. – Vol 37 (1). – P.59–66 (2006).
- 19 Popel S.I., Kopnin S.I., Golub A.P., Izvekova Yu.N. Dusty plasma at the surface of the moon // Solar System Research. – 2013. – Vol. 47(6). – P.419-29.
- 20 Popel S.I., Golub A.P., Izvekova Yu.N., Afonin V.V., Dolnikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Lisin E.A. and Petrov O.F. On the distributions of photoelectrons over the illuminated part of the moon // JETP Letters. – 2014. – Vol. 99(3). – P.115–120
- 21 Баимбетов Ф.Б., Рамазанов Т.С. Математическое моделирование в физике неидеальной плазмы // Алматы.: Ылым, 1994. – 212 с.
- 22 Li L., Zhang Y.T., Zhou B., Feng Y. Y. Dust levitation and transport over the surface of the Moon // Science China Earth Sciences. – 2016. – Vol.59(10). – P.2053–2061.
- 23 Pabari J. P., Banerjee D. Levitation of charged dust grains and its implications in lunar environment // Current science. – 2016. – Vol. 110(10). – P.1984-1989.
- 24 Wang X., Schwan J., Hood N., Hsu H. W., Grün E., Horanyi M. Experimental Methods of Dust Charging and Mobilization on Surfaces with Exposure to Ultraviolet Radiation or Plasmas J. Vis. Exp. (134), e57072.
- 25 Heijmans J., Nijdam S. Dust on a surface in a plasma: A charge simulation // Physics of L. C. Plasmas. – 2016. – Vol. 23. – 043703.

### References

- 1 K.P. Florensky, A.T. Bazilevsky, O.V. Nikolaeva. Lunar soil: properties and analogues (Moscow, USSR Academy of Vernadsky Sciences Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, 1975), 1–50. (in Russ).
- 2 S.I. Popel, A.P. Golub, L.M. Zelenyi, M. Horanyi, JETP Letters, 105, 594-599 (2017). (in Russ).
- 3 M. Horanyi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grun, R. Srama, Z. Sternovsky, Nature 522, 324 -326 (2015).
- 4 E.A. Lisin, V.P. Tarakanov, O.P. Petrov, S.I. Popel, G.G. Dolnikov, A.V. Zakharov, L.M. Zeleny, V.E. Fortov. JETP Letters. 98(11), 755–761(2013). (in Russ).
- 5 X. Wang, M. Horányi and S. Robertson. J. Geophys. Res. 115(A11), A11102 (2010).
- 6 N.N. Skvortsova, S.A. Mayorov, D.V. Malakhov, V.D. Stepakhin, E.A.Obraztsova, A.I. Kenzhebekova, O.S. Shishilov. JETP Letters, 109(7), 452–459 (2019). (in Russ).
- 7 Stubbs T. J., Halekas J.S., Farrell W. M. and Vondrak R. Lunar surface charging: a global perspective using lunar prospector data, Workshop on dust in planetary systems (Kaua‘i, Hawai‘I, September 26–30,2005), 139-140.
- 8 R.C. Elphic, G. T. Delory, B. P. Hine et al., Space Sci. Rev., 185, 128 (2014).
- 9 B.R. De, D.R. Criswell, J. Geophys. Res., 82(7), 999-1004 (1977).
- 10 B. R. De, D.R. Criswell, J. Geophys. Res., 82(7), 1005-1007 (1977).
- 11 J.E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson and S. Sture, Reviews of Geophysics, 45(2), RG2006 (2007).
- 12 J.E. Colwell, A. Gulbis, M. Horányi, S. Robertson, Icarus 175(1), 159-169 (2005).
- 13 T. Nitter, O. Havnes, F. Melandso, Journal of Geophysical Research atmospheres 103(A4), 6605-6620 (1998).
- 14 T. Nitter, O. Havnes, Earth Moon and Planets 56(1), 7-34 (1992).
- 15 T. Nitter, T. K. Aslaksen, T. K., F. Melandso, O.Havnes, IEEE Trans. Plasma Sci., 22(2), 159–172 (1994).
- 16 A. Poppe, M. Horányi, J. Geophys. Res., 115, A08106, (2010).
- 17 M. Horanyi, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 34, 383–418 (1996).
- 18 T. J. Stubbs, R.R. Vondrak and W.M. Farrell, Adv.Space Res., 37 (1). 59–66 (2006).
- 19 S.I. Popel, S.I. Kopnin, A.P. Golub, Yu.N. Izvekova, Solar System Research 47(6), 419-29 (2013).
- 20 S.I. Popel, A.P. Golub, Yu.N. Izvekova, V.V. Afonin, G.G. Dolnikov, A.V. Zakharov, L.M. Zelenyi, E.A. Lisin and O.F. Petrov. JETP Letters, 99(3), 115–120 (2014).
- 21 Ph.B. Bayimbetov, T.S. Ramazanov, Mathematical modeling in non-ideal plasma physics (Almaty, Gylym, 1994), 212. (in Russ).
- 22 L. Li, Y. T. Zhang, B. Zhou, Y.Y. Feng. Science China Earth Sciences, 59(10), 2053–2061 (2016).
- 23 J.P. Pabari, D. Banerjee. Current science, 110(10), 1984-1989 (2016).
- 24 X. Wang, J. Schwan, N. Hood, H.W. Hsu, E. Grün, M. Horányi, J. Vis. Exp. (134), e57072,
- 25 L.C.J. Heijmans, S.Nijdam. Physics of Plasmas, 23, 043703 (2016).