

## ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ У ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ ПРИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛАЗМОЙ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

<sup>1,2</sup>Т.И. Морозова, <sup>1,2</sup>С.И. Попель

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МФТИ (ГУ), Долгопрудный, Россия

timoroz@yandex.ru

## WAVE PROCESSES IN THE MOON'S SURFACE DUSTY PLASMA AS IT INTERACTS WITH THE EARTH'S MAGNETOTAIL PLASMA

<sup>1,2</sup>T.I. Morozova, <sup>1,2</sup>S.I. Popel

<sup>1</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>MIPT (SU), Dolgoprudny, Russia

---

**Аннотация.** Представлено описание волновых процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны. Рассматриваются случаи гидродинамической неустойчивости, пылевой звуковой неустойчивости, ионно-звуковой турбулентности и пылевой звуковой турбулентности.

**Ключевые слова:** плазма в Солнечной системе, нано- и микро объекты в Солнечной системе, плазменно-пылевые системы, нелинейные волны и неустойчивости в пылевой плазме, хвост магнитосферы Земли, поверхность Луны.

**Abstract.** The description of the wave processes in the interaction of the tail of the earth's magnetosphere with dusty plasma near the lunar surface is presented. The cases of hydrodynamic instability, dust sound instability, ion-acoustic turbulence and dust sound turbulence are considered.

**Keywords:** Solar System plasma, nano- and microscale objects in Solar System, plasma-dust systems, nonlinear waves and instabilities in dusty plasma, Earth's magnetotail, Moon's surface.

---

### Введение

В настоящее время немаловажная роль принадлежит выявлению свойств и проявлений заряженной пыли у поверхности Луны. Интерес усиливается в преддверии предстоящих лунных миссий. В России планируется запуск посадочных модулей Луна-25 и Луна-27, на которых будет установлена аппаратура, детектирующая заряженные частицы и измеряющая их концентрацию в зависимости от электрического потенциала. Также будут проведены оптические измерения пылевых частиц. В этой связи в последнее время возник интерес к описанию плазменно-пылевой системы у поверхности Луны.

Считается, что 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 Луны слоя фотоэлектронов. Также сами пылевые частицы могут испускать фотоэлектроны при взаимодействии с солнечным излучением. Пылевые частицы, находящиеся над поверхностью Луны поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра и электроны и ионы плазмы хвоста магнитосферы Земли. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Получается, что над освещенной частью Луны появляется слой положительно заряженных пылевых частиц, которые левитируют на расстоянии

около двух метров над поверхностью Луны. На темной стороне Луны частицы заряжаются отрицательно из-за отсутствия солнечного излучения и фотоэффекта. В данной работе рассматривается плазменно-пылевая система над освещенной частью Луны.

Важное место в исследовании свойств плазменно-пылевой системы у поверхности Луны принадлежит изучению волновых процессов. В настоящей работе исследуются возможные взаимодействия пылевой плазмы над лунной поверхностью с плазмой хвоста магнитосферы Земли. До сих пор исследование плазменно-пылевой системы у Луны проводилось, в основном, для ситуации, когда Луна находилась вне хвоста магнитосферы Земли. Хвост магнитосферы, внутри которого Луна проводит около четверти своей орбиты (рис. 1), содержит очень разреженную плазму в долях геомагнитного хвоста и более плотную и горячую плазму плазменного слоя. Движение Луны, а вместе с ней и окололунной плазмы, относительно хвоста магнитосферы Земли происходит со скоростью порядка 1 км/с. Это относительное движение двух плазменных систем – пылевой плазмы у поверхности Луны и плазмы хвоста магнитосферы Земли может приводить к возникновению неустойчивостей и турбулентных процессов.

### Параметры пылевой плазмы

Характерные параметры фотоэлектронов для освещенной части Луны приведены в таблице. Значения электронов и ионов солнечного ветра и плазмы хвоста магнитосферы Земли приведены на рис. 2. Характерный размер пыли — 100 нм, концен-

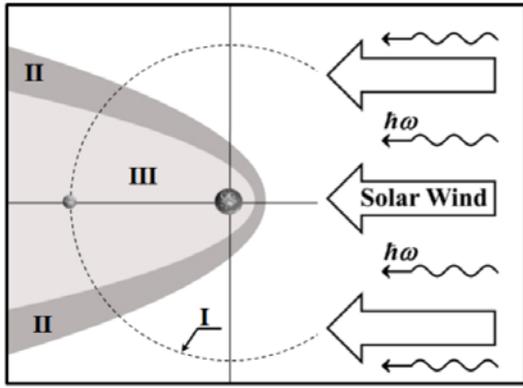


Рис. 1. Луна в хвосте магнитосферы Земли

Параметры фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности (А — солнечная вспышка класса X28, В — солнечный максимум, С — солнечный минимум) и различных значений квантового выхода Y1 [Walbrige, 1973] и Y2 [Wills et al., 1973]

	А	В	С
$n_{e(ph)Y1}, \text{см}^{-3}$	$2.2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^5$
$T_{e(ph)Y1}, \text{эВ}$	0.2	0.1	0.1
$n_{e(ph)Y2}, \text{см}^{-3}$	$8.6 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$
$T_{e(ph)Y2}, \text{эВ}$	2.1	1.9	1.3

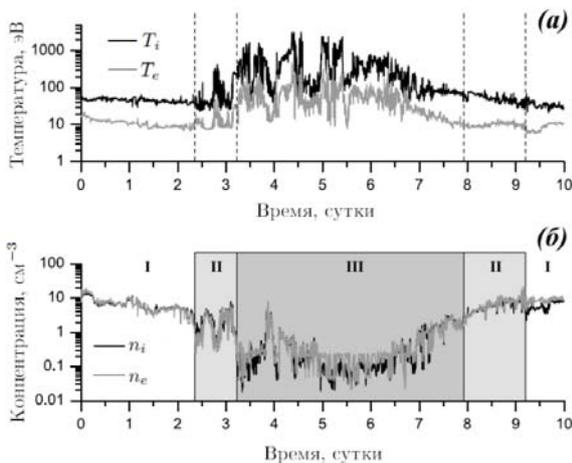


Рис. 2. Температура и концентрация электронов и ионов солнечного ветра и магнитосферы Земли на орбите Луны [Vaverka et al., 2015]

трация —  $10 \text{ см}^{-3}$ . Это соответствует зарядовому числу порядка 10. Такие большие концентрации пылевых частиц связаны с большими концентрациями фотоэлектронов. Для сравнения, концентрация пыли на темной стороне Луны падает на три несколько порядков.

### Линейные неустойчивости

Простейшая неустойчивость — это гидродинамическая неустойчивость типа Бунемана. Рассматриваемая неустойчивость соответствует случаю, когда исходные функции распределения ионов магнитосферы и пылевых частиц имеют вид двух дельта-функций, сдвинутых относительно друг друга на величину скорости движения Луны по своей орбите.

Характерное время развития неустойчивости — 0.1 с для области II с рис. 2, где параметры плазмы соответствуют развитию данной неустойчивости. Таким образом, время нахождения в этой области (24 ч) много больше 0.1, что позволяет говорить о развитии данной неустойчивости.

Следующая неустойчивость — кинетическая неустойчивость (аналогичная ионно-звуковой неустойчивости для плазмы в отсутствии пыли).

Характерное время развития составляет один час. Таким образом, в период взаимодействия хвоста магнитосферы с Луной, которое продолжается около семи земных суток, возможно развитие пылевой звуковой неустойчивости.

### Нелинейные процессы

Предполагается следующий механизм развития плазменной турбулентности. Ионы плазмы магнитосферы раскачивают колебания вследствие гидродинамической и кинетической неустойчивостей. Вследствие этого имеет место аномальная потеря импульса ионов (его передача коллективным движениям пылевых частиц). В стационарном состоянии насыщения, достигаемого, когда рост неустойчивости ограничивается нелинейными процессами, имеет место турбулентный нагрев плазмы, одинаковый для ионной и пылевой компонент.

В результате развития ионно-звуковой турбулентности возникают электрические поля 0.3 В/м, в результате пылевой звуковой турбулентности —  $10^{-6}$  В/м (характерные значения полей у поверхности Луны  $\sim 1$  В/м).

### Заключение

В работе представлено описание волновых процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны. Картина волновых процессов существенным образом зависит от параметров плазменно-пылевой системы. Так, например, возбуждение ионно-звуковых волн возможно в областях магнитного-переходного и пограничного слоев магнитосферы для фотоэлектронов с температурой порядка 1 эВ [Wills et al., 1973]. Для таких же параметров фотоэлектронов возможно возбуждение пылевых звуковых волн во всей области хвоста магнитосферы Земли. В обоих случаях развитие неустойчивости обусловлено относительным движением ионов магнитосферы и заряженных пылевых частиц. Оказывается, что в результате длительного характера развития неустойчивостей успевает установиться плазменная турбулентность. Ионно-звуковая турбулентность рассматривается с позиций сильной турбулентности, тогда как для описания пылевой звуковой турбулентности используется теория слабой турбулентности. Для случаев ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности определены плотности энергии колебаний, эффективные частоты столкновений, а также возникающие в системе электрические поля. Оказывается, что при развитии ионно-звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системе у Луны могут возбуждаться электрические поля, несколько

меньшие электрических полей у поверхности Луны, возникающих в процессе зарядки ее поверхности при взаимодействии Луны с солнечным излучением, но, тем не менее, вполне значимые для установления адекватной картины электрических полей над Луной. Полученные эффективные частоты столкновений следует учитывать при записи гидродинамических уравнений для ионов пылевой плазмы с учетом ее турбулентного нагрева [Морозова и др., 2015].

Работа выполнена по Программе № 7 фундаментальных исследований Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд», по Программе Международного института по космическим наукам (International Space Science Institute) “Dusty Plasma Effects in the System Earth-Moon”, а также при поддержке РФФИ (проект № 15-02-05627-а).

### **Список литературы**

- Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B. // Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space. 1973. P. 389.
- Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. // Plasma Phys. Rep. 2015. V. 41. P. 799.
- Walbrige E. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3668]
- Wills et al. // Photon and Particle Interactions with Surface in Space. 1973. P. 386.
- Vaverka et al. // Astrophys. J. 2015. V. 825, N 2. P. 133.