

УДК 533.9; 523.3

## ОКОЛОЛУННАЯ ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА: ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РАМКАХ МИССИИ “ЛУНА-25”

© 2024 г. С. И. Попель<sup>a, \*</sup>, Л. М. Зелёный<sup>a</sup>, А. В. Захаров<sup>a</sup>, И. А. Кузнецов<sup>a</sup>,  
Г. Г. Дольников<sup>a</sup>, А. Н. Ляш<sup>a</sup>, И. А. Шашкова<sup>a</sup>, А. А. Карташева<sup>a</sup>,  
А. Е. Дубов<sup>a</sup>, М. Э. Абделаал<sup>a</sup>, Ю. С. Резниченко<sup>a</sup>

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

\*e-mail: popel@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.06.2024 г.

После доработки 09.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Приводится краткий обзор по теоретическим исследованиям окололунной пылевой плазмы, важными факторами при формировании которой являются электростатические процессы и удары микрометеороидов о поверхность Луны. Впервые представлено описание данных наблюдений пылевых частиц в окрестностях Луны, полученных в рамках миссии “Луна-25”. Показано, что имеется, по крайней мере, одно достоверное наблюдение пылевой частицы либо имеющей лунное происхождение, либо связанной с высокоскоростным потоком Персеиды. Проведено обсуждение необходимости усовершенствования прибора “Пылевой мониторинг Луны” на посадочном аппарате “Луна-27”. Усовершенствование связано с необходимостью установки штанги для размещения электростатических датчиков на достаточном удалении от аппарата, что желательно для уменьшения возмущений окружающей плазмы и приповерхностного электростатического поля из-за влияния посадочного аппарата.

*Ключевые слова:* пылевая плазма, Луна, лунная ионосфера, фотоэлектроны, левитирующие пылевые частицы, метеороиды, “Луна-25”, “Луна-27”

DOI: 10.31857/S0367292124100079, EDN: FCOWYI

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на лунной поверхности составляет несколько сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам астронавтов (рис. 1), поверхностям космических аппаратов, приборам и т. д., что может угрожать работе систем. На скафандрах пыль заносится внутрь лунного модуля, и весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты могут вдыхать ее частицы, присутствующие в состоянии невесомости в воздухе. Таким образом, лунная пыль представляет собой существенный фактор риска и для здоровья астронавтов.

Первые указания о присутствии пыли в приповерхностном слое над Луной были получены автоматическими спускаемыми космическими аппаратами Surveyor, которые с помощью телевизионной камеры получили изображения лунного горизонта после заката Солнца. Эти изображения обнаруживают приповерхностное (с характерными высотами ~10–30 см) свечение над областью лунного терминатора [1]. Объяснение этого эффекта обычно связывают [2, 3] с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах.

В рамках измерений, проводимых с помощью астрофотометра на борту “Лунохода-2”, также предполагалось, что частицы пыли над поверх-



**Рис. 1.** Астронавт “Аполлона-17” Harrison Schmitt собирает частицы лунного грунта. Нижняя часть его скафандра покрыта пылью.

ностью Луны рассеивают свет [4]. Оценки, проведенные по результатам этих измерений, указали на то, что облако пыли, рассеивающее солнечный свет, находилось на высоте 260 м над лунной поверхностью.

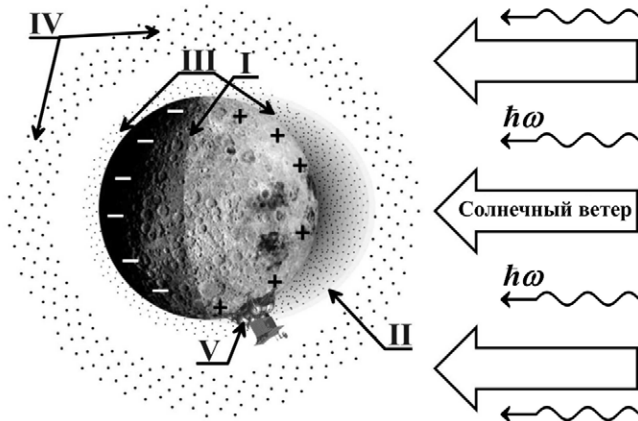
О присутствии пыли в лунной экзосфере также косвенно свидетельствуют данные советских экспедиций “Луна-19” и “Луна-22” по определению концентрации электронов над Луной посредством метода радиозатменных измерений [5, 6]. На основе этих измерений оказывается возможным сделать вывод о существовании “лунной ионосферы” над освещенной солнечным излучением стороной Луны с пиковой концентрацией электронов  $n_e \sim 500\text{--}1000 \text{ см}^{-3}$  и характерным высотным масштабом  $\sim 10\text{--}30 \text{ км}$ . Эти величины согласуются с данными, полученными на основе радиозатменных измерений Крабовидной туманности в ситуации, когда наблюдалось преломление радиоволн в окрестности Луны [7, 8]. Столь высокие концентрации электронов могут быть обусловлены присутствующими на больших высотах над Луной заряженными пылевыми частицами [9].

Первое непосредственное обнаружение пылевых частиц у поверхности Луны относится к эксперименту LEAM (Lunar Ejecta and Meteorite), который был проведен астронавтами в рамках миссии “Аполлон-17” [10, 11]. Установка

LEAM разрабатывалась, в основном, для обнаружения высокоскоростных микрометеоритов, движущихся со скоростями  $1 < v < 25 \text{ км/с}$ . Тем не менее конструкция одного из детекторов позволяла зарегистрировать сравнительно низкоскоростные частицы. Именно этот детектор позволил получить данные о достаточно интенсивных потоках низкоскоростных частиц ( $v \sim 100\text{--}1000 \text{ м/с}$ ), заряд которых, как правило, составлял  $Q > 10^{-12} \text{ Кл}$ . Как было показано, фоновые потоки этих частиц сравнимы с потоками, зафиксированными пылевыми приборами на борту космического аппарата «Pioneer 8» в межпланетном пространстве [12].

В рамках миссии NASA LADEE [13, 14] измерения характеристик пыли проводились, в частности, с помощью ударного ионизационного датчика пыли LDEX, позволяющего напрямую детектировать пылевые частицы на орбите космического аппарата. Научная цель экспериментов состояла в определении распределений пылевых частиц по высотам, размерам и концентрациям над различными участками лунной поверхности. Установка LDEX позволяла фиксировать индивидуальные пылевые частицы с радиусами, большими 0.3 мкм, и измерять кумулятивный заряд от нескольких более мелких частиц (от 0.1 мкм до 0.3 мкм). С помощью LDEX удалось определить среднюю скорость соударений пылевых частиц с прибором, составляющую приблизительно 1 и 0.1 ударов в минуту для частиц с зарядами  $q > 0.5 \text{ фКл}$  и  $q > 5 \text{ фКл}$ , которые соответствуют размерам частиц  $a > 0.3 \text{ мкм}$  и  $a > 0.7 \text{ мкм}$ . Измерения, проведенные с помощью установки LDEX, обнаруживают присутствие разреженного, но устойчиво существующего облака небольших пылевых частиц с радиусами от  $< 0.3 \text{ мкм}$  до  $> 0.7 \text{ мкм}$ .

Считается, что над Луной сформирована плазменно-пылевая система (рис. 2). Так, на освещенной стороне Луны ее поверхность заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли [15–25]. 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 послед-



**Рис. 2.** Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ( $\hbar\omega$ ), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей миссии “Луна-27”.

них 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 [18]. Описанные выше электростатические процессы, а также магнитное поле хвоста магнитосферы Земли, приводящее к возможности меридионального переноса пыли над лунной поверхностью [25], являются важными факторами формирования плазменно-пылевой системы над лунной поверхностью. Кроме того, определенный вклад в формирование плазменно-пылевой системы над поверхностью Луны вносят удары метеороидов [26, 27], приводящие, в том числе, к формированию плазменно-пылевого облака на больших высотах [28]. Наблюдаемые в рамках лунной миссии КНР ChangE-3 потоки массы пылевых частиц определялись микрометровыми пылевыми частицами, происхождение которых было обусловлено выбросами вещества реголита с лунной поверхности в результате ударов метеороидов [29].

В России для исследования пыли и пылевой плазмы над лунной поверхностью разрабатывались эксперименты на космических аппаратах

“Луна-25” и “Луна-27” [30]. К сожалению, спускаемому аппарату “Луны-25” не удалось осуществить мягкую посадку. Тем не менее прибор, установленный на космическом аппарате “Луна-25” и предназначенный для регистрации пылевых частиц над поверхностью Луны и определения параметров окружающей плазмы, зарегистрировал в космическом пространстве ряд событий, которые связаны с ударами пылевых частиц о его поверхность. Как ожидается, детальные исследования приповерхностной пыли и пылевой плазмы на Луне будут проведены в рамках миссии “Луна-27”.

В настоящей работе приводятся основные выводы, касающиеся пыли и пылевой плазмы у Луны, сформулированные к настоящему времени, а также дается описание экспериментальных результатов, связанных с наблюдениями пыли в рамках миссии “Луна-25”. В разделе 2 настоящей статьи приводится описание частиц лунного реголита, поднимающихся над поверхностью Луны и вносящих существенный вклад в пылевую компоненту плазмы над поверхностью Луны, а также их распределений по размерам. Раздел 3 посвящен описанию околослунной пылевой плазмы, сформированной с участием электростатических процессов. В разделе 4 рассматривается плазменно-пылевое облако на больших высотах над лунной поверхностью. Данные, полученные космическим аппаратом “Луна-25” на орбите вокруг Луны, обсуждаются в разделе 5. Раздел 6 посвящен обсуждению необходимости усовершенствования прибора “Пылевой мониторинг Луны” на посадочном аппарате “Луна-27”, что предполагает установку штанги для размещения электростатических датчиков на достаточном удалении от аппарата. В разделе 7 сформулированы основные выводы работы.

## 2. ЧАСТИЦЫ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Обычно в качестве пылевой компоненты плазмы над поверхностью Луны рассматривают частицы лунного реголита, поднятые либо в результате электростатических процессов (см., например, [18]), либо вследствие ударов метеороидов [26–28]. Лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стекол, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т. д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами опла-



ления и спекания. На рис. 3 представлены примеры фотографий [31] мелкодисперсных частиц различной природы, содержащихся в лунном грунте.

Существенным при описании подъема пылевых частиц над Луной является распределение по размерам частиц, присутствующих на ее поверхности. Несмотря на вариабельность формы слагающих реголит частиц их распределение на поверхности Луны удовлетворяет логарифмически-нормальному закону (распределению Колмогорова), что оказывается типичным для случая многократного дробления [32]. Последнее утверждение было сформулировано А.Н. Колмогоровым на основе предельной теоремы в вероятностной модели многократного дробления частиц некоторой исходной совокупности. При этом предполагалось, в частности, что

1) в начальный момент времени имеется определенное число частиц с произвольным распределением по размерам;

2) вероятность дробления каждой частицы и полученное в результате распределение по раз-

мерам осколков не зависят от размеров частицы, от ее истории и от других частиц;

3) число дроблений велико.

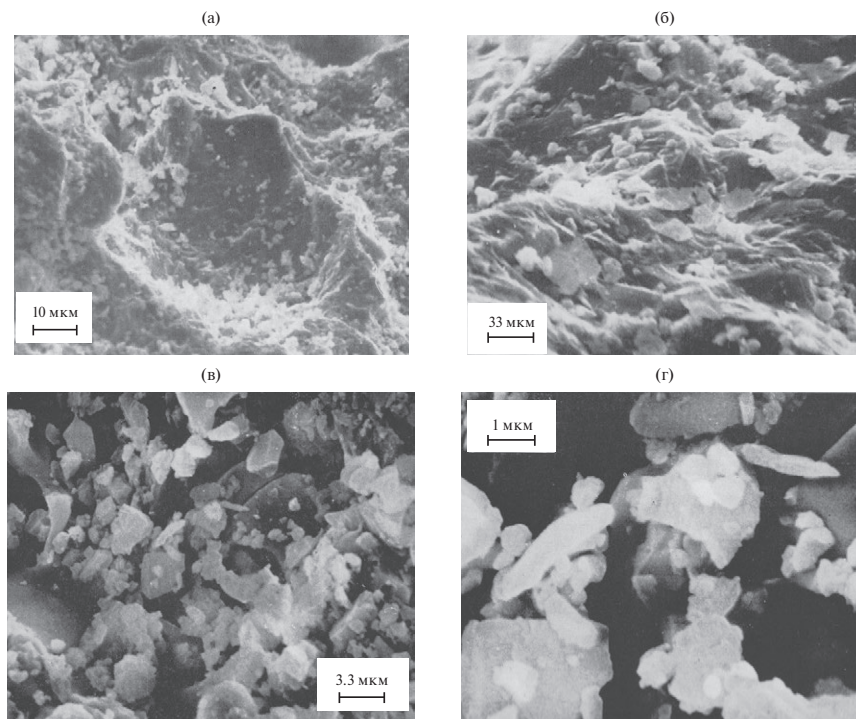
Таким образом, существенными предположениями при выводе логнормального закона распределения частиц по размерам являются постоянство вероятности дробления в ходе процесса и многократность дробления [33].

Итак, для описания распределения по размерам частиц, составляющих лунный реголит, используется формула Колмогорова, характеризующая материалы, сформированные в результате многократного дробления породы:

$$\Phi_K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \quad (1)$$

где  $t = (\ln a - \ln(a_K)) / \sigma_K$ ,  $a$  — размер частицы,  $a_K$  и  $\sigma_K$  — параметры распределения;  $\Phi_K(t)$  — вероятность обнаружить частицу лунного реголита с радиусом (размером), меньшим  $a$ .

Справедливость логнормального распределения (распределения Колмогорова) по размерам частиц лунного реголита подтверждается экспери-



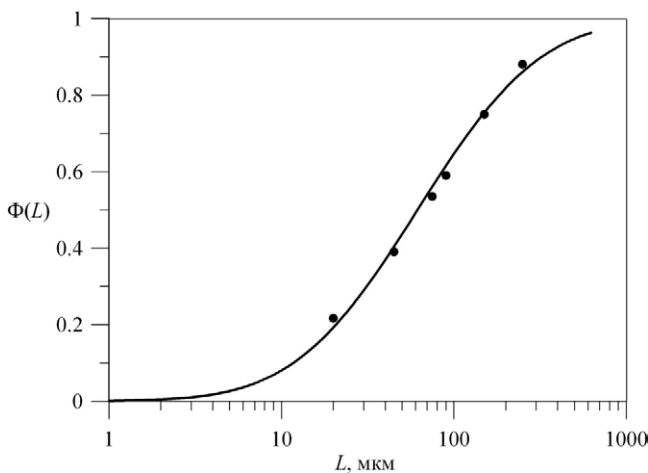
**Рис. 3.** Примеры фотографий [31] мелкодисперсных частиц различной природы, содержащихся в лунном грунте (“Луна-16”): участок поверхности морского базальта, содержащий мелкие частицы (а). Виден относительно глубокий ударный кратер, воронка которого имеет заметные следы оплавления; типичный участок поверхности морского базальта (б). Хорошо заметен его неровный мелкобугорчатый рельеф, обусловленный мелкозернистой структурой породы и характером поверхности слагающих его минеральных зерен; характер поверхностной структуры агглютината (в); увеличенное изображение центральной части рис. 3в, демонстрирующее вариабельность формы и размера слагающих агглютинат зерен (г).

ментальными данными. Например, в работе [34] приведены данные по размерам частиц пыли на поверхности Луны в диапазоне от 20 до 500 мкм. На рис. 4 представлены теоретическое распределение Колмогорова (для параметров  $a_K = 61.56$  мкм,  $\sigma_K = 1.29$ ), описывающее данные наблюдений [34], а также экспериментальные точки. Видно хорошее согласие экспериментальных данных с распределением Колмогорова.

Обычно распределение Колмогорова применяется для микрометровых частиц. Однако важную роль в формировании пылевой плазмы над поверхностью Луны играют нанометровые частицы. В [35] показано, что для случая многократного дробления распределение Колмогорова остается справедливым, по крайней мере, для размеров частиц, больших или порядка 100 нм, что позволяет нам продлить полученное на основе данных [34] распределение пылевых частиц лунной поверхности в сторону меньших размеров вплоть до размеров порядка 100 нм. Справедливость логнормального распределения для нанометровых частиц лунного реголита подтверждается данными работы [36].

### 3. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОКОЛОЛУННАЯ ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

В качестве пылевой компоненты плазмы вблизи поверхности Луны обычно рассматривают частицы лунного реголита, поднятые в результате электростатических процессов. Наиболее “мощ-



**Рис. 4.** Теоретическое распределение Колмогорова [35], описывающее данные наблюдений пылевых частиц на поверхности Луны (сплошная кривая). Точки соответствуют данным, приведенным в работе [34].

ная” плазменно-пылевая экзосфера сосредоточена над обращенной к Солнцу стороной Луны, которая находится под действием солнечного ветра и излучения. В ней важную роль приобретает фотоэффект, за счет которого освещенная солнечным светом поверхность Луны приобретает положительный заряд. В результате пылевая плазма над освещенной стороной Луны содержит электроны и ионы солнечного ветра, левитирующие пылевые частицы, фотоэлектроны, поступающие в экзосферу в результате фотоэмиссии с лунной поверхности и с поверхностями левитирующих пылевых частиц.

Вычисление распределений пыли и электронов в приповерхностном слое освещенной части Луны производится на основе теоретической модели [18, 20], которая описывает динамику невзаимодействующих пылевых частиц, а также их зарядку. В рамках рассматриваемой модели 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 распределения пылевых частиц определяют количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить ее удастся 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.

Для определения распределений (по размерам и высотам) пылевых частиц над поверхностью Луны вычисляется вероятность присутствия частицы на определенной высоте (обратно пропорциональная времени присутствия частицы на этой

высоте) [18]. Указанная вероятность умножается на нормировочный множитель, который вычисляется таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание распределения (по размерам) лунной пыли, находящейся на поверхности Луны. Для определения нормировочного множителя использовались данные [34] в диапазоне размеров частиц пыли на поверхности Луны от 20 до 500 мкм (см. рис. 4).

Важным параметром, необходимым для расчетов, является концентрация фотоэлектронов непосредственно у поверхности Луны, которые возникают, главным образом, от ее поверхности (но не от поверхностей парящих пылевых частиц) при взаимодействии с солнечным излучением [20, 37]. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям определяется стандартным образом [38] на основе расчета плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твердым телом под действием излучения. Полученная таким образом функция распределения может быть использована для нахождения концентрации  $N_0$  и температуры  $T_e$  фотоэлектронов в приповерхностном слое Луны. При вычислении функции распределения фотоэлектронов, их концентрации и температуры важными параметрами являются квантовый выход и работа выхода лунного реголита. Несмотря на существенные вариации количества энергии, излучаемой Солнцем в ультрафиолетовом диапазоне (основном с точки зрения испускания фотоэлектронов), эти вариации не приводят к существенным (на порядки величины) изменениям значений  $N_0$  и  $T_e$  [20]. Типичные значения работы выхода  $W$  для лунного реголита варьируются в пределах 5–6 эВ.

Квантовый выход  $Y(E_{ph})$ , определяющий число электронов, выбиваемых с поверхности одним фотоном, является весьма важным параметром, требующим дальнейших уточнений. Действительно, в работах, посвященных исследованию плазменно-пылевой системы и/или фотоэлектронам у поверхности Луны, как правило, используются зависимости значения квантового выхода, приведенные в работах [38] и [39]. Наиболее вероятный квантовый выход вещества лунной поверхности, приведенный на рис. 11 в работе [38], может быть аппроксимирован следующим образом:

$$\begin{aligned} Y(E_{ph}) &= 0, & E_{ph} < 6, \\ Y(E_{ph}) &\approx 0.02 + 0.06(E_{ph} - 6), \\ 6 \leq E_{ph} \leq 9, & Y(E_{ph}) \approx 0.2, & E_{ph} \geq 9. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь энергия фотона  $E_{ph}$  выражается в эВ; подразумевается, что работа выхода  $W = 6$  эВ. Квантовый выход, полученный в [39], является результатом экспериментального исследования, выполненного на образцах лунной пыли, доставленных на Землю в рамках миссий Аполлон-14 и -15. Зависимость квантового выхода [39] существенным образом отличается от теоретической (полуэмпирической) зависимости (2). Прежде всего, максимальное значение квантового выхода [39], приблизительно равное  $0.09 \pm 0.003$ , достигается при длине электромагнитной волны, приблизительно равной  $900 \text{ \AA}$ , что, в свою очередь, соответствует  $E_{ph} \approx 13.7$  эВ. При значениях  $E_{ph}$ , больших и меньших  $13.7$  эВ, величина квантового выхода существенным образом уменьшается (на несколько порядков величины). Так, при  $E_{ph} \approx 7$  эВ  $Y(E_{ph})$  падает до значения  $\sim 10^{-6}$ , при приближении  $E_{ph}$  к работе выхода квантовый выход уменьшается еще на 1–2 порядка величины.

В табл. 1 приведены параметры фотоэлектронов ( $N_0$ ,  $T_e$ ), рассчитанные [20] 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 индекс “Y1” в  $N_0$  и  $T_e$  соответствуют квантовому выходу (2), а индексом “Y2” — квантовому выходу из работы [39]). Из табл. 1 видно, что существенная разница в значениях квантового выхода [38] и [39] 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 [38] и [39] также существенно более сильно сказываются на расчетах, чем вариации работы выхода (5–6 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  $\cos \theta$ .

Разница в расчетах с квантовыми выходами [38] и [39] обусловлена тем, что в первом случае существенный вклад вносят фотоны с энергиями, близкими к работе выхода. Именно эти фотоны, число которых велико, приводят к испусканию основной части фотоэлектронов. Во втором случае квантовый выход для энергий, достаточно

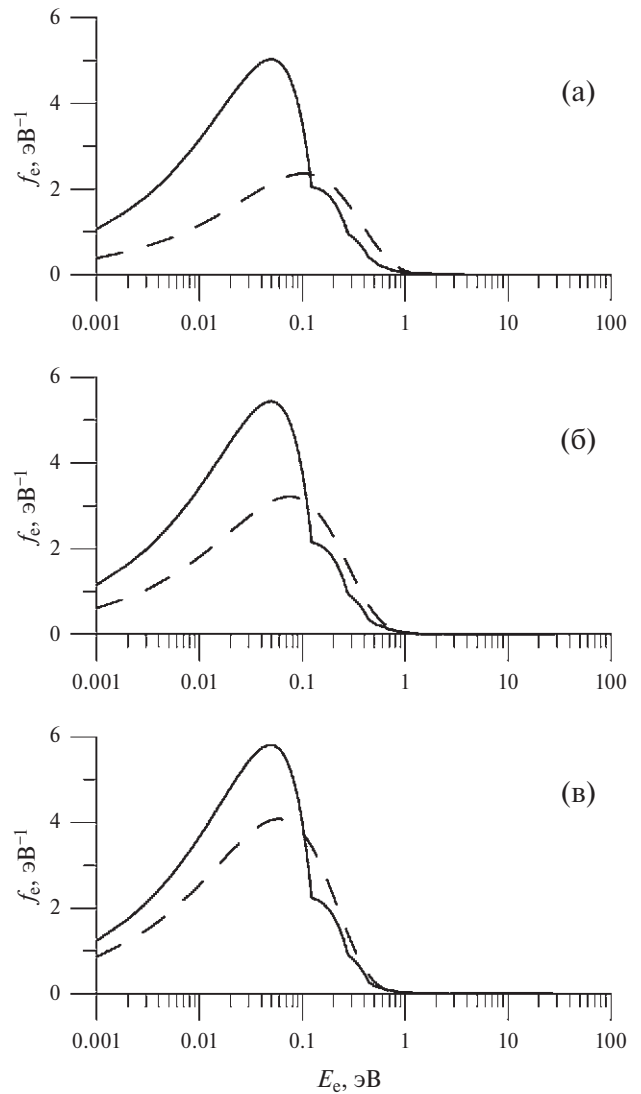


**Таблица 1.** Параметры фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности и различных значений квантового выхода.

	I	II	III
$N_{0I1}, \text{см}^{-3}$	$2.2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^5$
$T_{eI1}, \text{эВ}$	0.2	0.1	0.1
$N_{0I2}, \text{см}^{-3}$	$8.6 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$
$T_{eI2}, \text{эВ}$	2.1	1.9	1.3

близких к работе выхода, чрезвычайно мал, и генерация фотоэлектронов обусловлена, в основном, фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения, связанного с линией H Лайман-альфа (H Lyman-alpha) в спектре солнечного излучения. Соответственно, во втором случае число фотоэлектронов оказывается существенно меньшим, чем в первом, а температура — существенно большей.

Следует отметить, что несмотря на то, что средняя энергия фотоэлектронов (и, соответственно, их температура) в первом случае оказывается существенно меньшей, чем во втором, в первом случае также присутствует значительное число фотоэлектронов с энергиями порядка 1 эВ. На рис. 5 изображены функции распределения фотоэлектронов по энергиям  $f_e(E_e)$ , нормированные на единицу ( $\int_0^\infty f_e(E_e) dE_e = 1$ ), вычисленные для данных, соответствующих квантовому выходу (2) (работа выхода  $W = 6$  эВ) и различным уровням солнечной активности [20]. Указанные функции распределения отличаются от максвелловских. Отличие вызвано тем, что в эти функции распределения существенный вклад вносят фотоэлектроны (с энергиями, меньшими 0.1 эВ), выбитые с поверхности лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода. Кроме того, распределение фотоэлектронов с энергиями 1–2 эВ, чье происхождение связано с фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения, оказывается на 1–3 порядка величины больше соответствующего максвелловского распределения. Суммарная функция распределения в первом случае является суперпозицией функции распределения фотоэлектронов, выбитых фотонами с энергиями, близкими к работе выхода, и имеющих температуру порядка 0.1–0.2 эВ, а также функции распределения фотоэлектронов, связанных с линией H Лайман-альфа в спектре солнечного излучения и имеющих температуру порядка 1 эВ.



**Рис. 5.** Функции распределения фотоэлектронов  $f_e$  по энергиям  $E_e$  (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (в). Работа выхода лунного реголита  $W = 6$  эВ, квантовый выход определяется выражением (2). Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми.

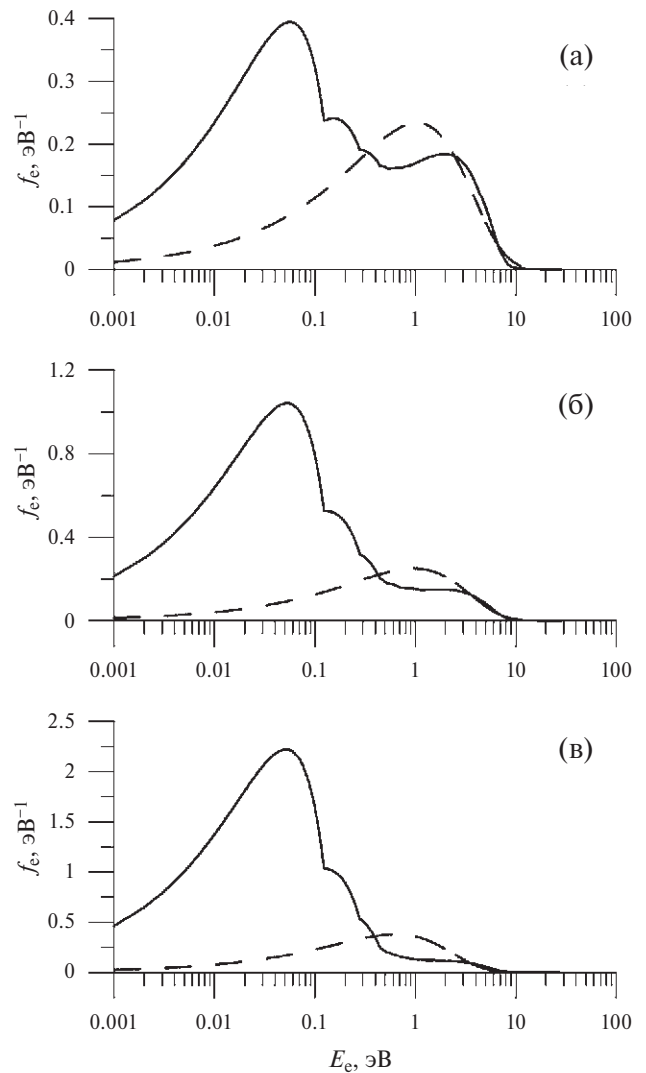
Хотя количество электронов с энергиями порядка 1 эВ на 2–3 порядка меньше числа фотоэлектронов с меньшими энергиями, фотоэлектроны с энергиями порядка 1 эВ должны наблюдаться при проведении соответствующих измерений.

Отличие от максвелловского распределения еще более существенно для функций распределения, вычисленных для значений квантового

выхода из работы [39] (рис. 6) [20]. При этом относительное количество электронов с энергиями порядка 1 эВ оказывается существенно большим, чем в первом случае, характеризуемым квантовым выходом (2). Кроме того, относительное число электронов с энергиями меньше или порядка 0.1 эВ также достаточно велико. Таким образом, и в этом случае (когда квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [39]) наблюдаться должны фотоэлектроны как с энергиями порядка 1 эВ, так и с энергиями порядка 0.1 эВ. Абсолютное значение концентрации фотоэлектронов с энергиями порядка 1 эВ в первом случае, характеризуемом квантовым выходом (2), оказывается даже больше, чем эта величина во втором случае. Причиной являются значения квантового выхода, которые даже в максимуме кривой, представленной в [39], не превосходят значений, определяемых выражением (2) для соответствующих энергий фотонов.

К сожалению, значения квантового выхода в работах [38] и [39] недостаточно обоснованы, что, в частности, обусловлено существенной сложностью обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его взаимодействия с земной атмосферой. В этой связи, существенный интерес представляет использование возможности измерения квантового выхода и работы выхода лунного реголита непосредственно на поверхности Луны в рамках будущих лунных миссий. Схема соответствующих экспериментов приведена в работе [20].

Данные, характеризующие распределения пылевых частиц для условий, соответствующих участкам лунного реголита, полученные для разных значений квантового выхода [38] и [39] на основе метода, развитого в [18], приведены соответственно на рис. 7 и 8. На рис. 7 и 8а—в 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



**Рис. 6.** Функции распределения фотоэлектронов  $f_e$  по энергиям  $E_e$  (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (в). Работа выхода лунного реголита  $W = 6$  эВ, квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [39]. Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми.

с размерами, представленными на этом графике. Рис. 7г и 8г представляют результаты вычислений максимально возможных высот подъема пылевых частиц различных размеров для различных значений угла  $\theta$ .

На рис. 7 и 8 представлены результаты расчетов распределения пылевых частиц для некоторых достаточно больших значений угла  $\theta$  (превышающих  $70^\circ$ ). Соответствующая широтная об-



ласть представляет интерес, поскольку посадка космического аппарата “Луна-27” будет осуществляться вблизи полярной области Луны. Аналогичные расчеты, проведенные и для меньших углов  $\theta$ , демонстрируют возможность подъема пылевых частиц над поверхностью Луны во всем диапазоне углов  $\theta$  [17]. Это опровергает существование так называемой “мертвой зоны” [15] (в окрестностях лунной широты  $80^\circ$ ), где (в соответствии с выводами работы [15]) частицы не поднимаются. Причиной этого является адекватное рассмотрение эффекта фотоэлектронов [17]. Итак, характерный размер  $a$  и характерная концентрация  $n_d$  заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются, соответственно, значениями порядка 100 нм и  $10^3 \text{ см}^{-3}$ . Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе, и фотоэлектронов, выбиваемых фотонами

солнечного излучения с поверхностей парящих пылевых частиц).

Над темной частью Луны фотоэлектроны отсутствуют. Концентрация заряженной пыли оценивается при этом из соотношения [22]  $n_d \sim n_{e,S} / |Z_d|$ , где  $n_{e,S}$  — концентрация фотоэлектронов солнечного ветра,  $Z_d$  — зарядовое число пылевой частицы ( $q_d = -Z_d e$  — заряд пылевой частицы,  $-e$  — заряд электрона). Для пылевых частиц с размерами порядка 100 нм оценка их концентрации над темной частью Луны дает  $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, имеется существенный скачок концентрации пыли в области лунного терминатора, при этом можно ожидать достаточно сложного поведения характеристик плазменно-пылевой системы.

Оказывается, что в окрестности терминатора, скорость движения которого относительно поверхности Луны составляет в области экватора примерно 4 м/с, существует область, которая

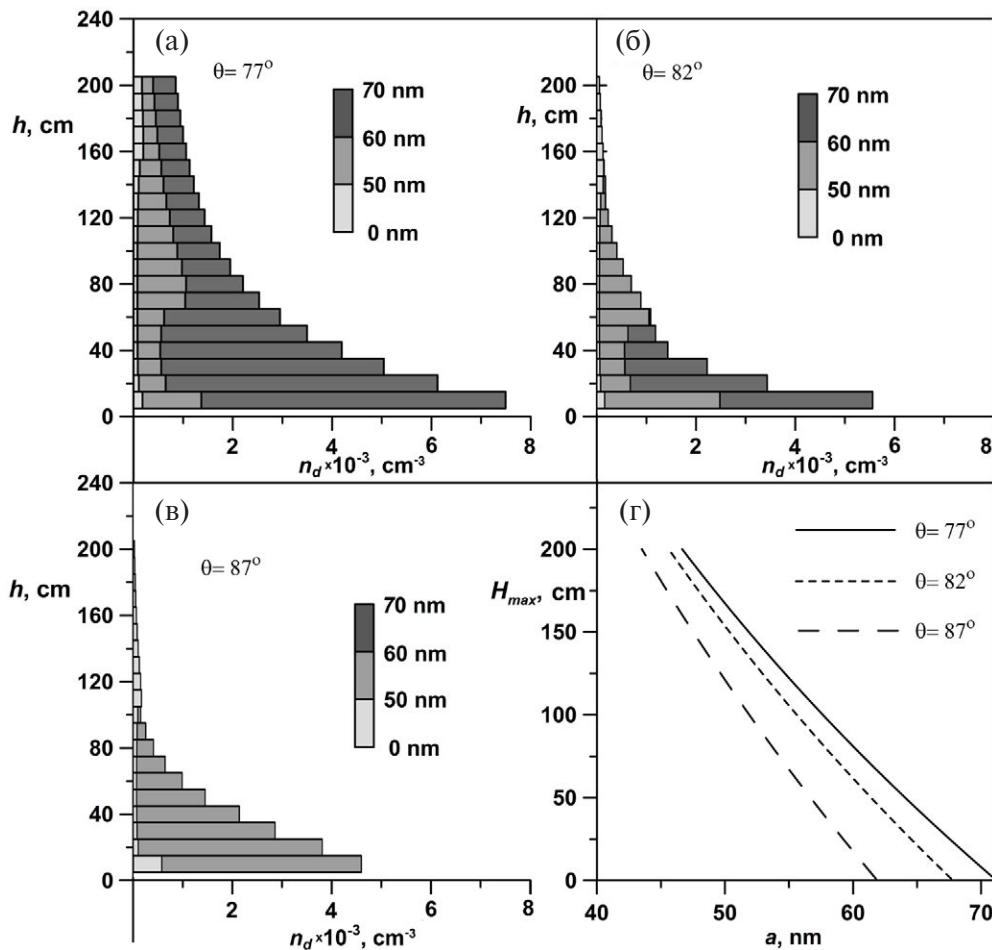


Рис. 7. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений угла между местной нормалью и направлением на Солнце  $\theta = 77^\circ$  (а),  $82^\circ$  (б),  $87^\circ$  (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для  $N_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.1 \text{ эВ}$ .

представляет собой аналог плазменного слоя (рис. 9). Само движение терминатора можно трактовать как движение нелинейной пылевой звуковой структуры [22]. Плазменный слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме над освещенной частью Луны за счет электростатических сил удерживаются электроны. Ширина плазменной возмущенной области, связанной с терминатором, определяется ионным дебаевским радиусом  $\lambda_{Di}$  и составляет величину  $\sqrt{2}\lambda_{Di} \sim 10$  м. В этой области возникают значительные электрические поля ( $E \sim 300$  В/м), которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Предложенный эффект может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor.

#### 4. ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВОЕ ОБЛАКО НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ НАД ЛУНОЙ: РОЛЬ МЕТЕОРОИДОВ

Электростатические процессы существенным образом сказываются на свойствах окололунной пылевой плазмы на небольших высотах (вплоть до десятков, возможно, сотен метров) над лунной поверхностью. При формировании плазменно-пылевого облака на больших высотах  $\sim 10\text{--}100$  км важную роль играет расплавленное вещество, выбрасываемое с поверхности Луны в результате ударов метеороидов [28].

Количество ударов метеороидов о лунную поверхность определяется значениями их потока. При этом используются зависимости  $F_i(m_i)$  [40], характеризующие плотность потока метеороидов с массами, превосходящими  $m_i$ , в околоземном космическом пространстве (аналогичную плотности потока метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью). Согласно результатам работы

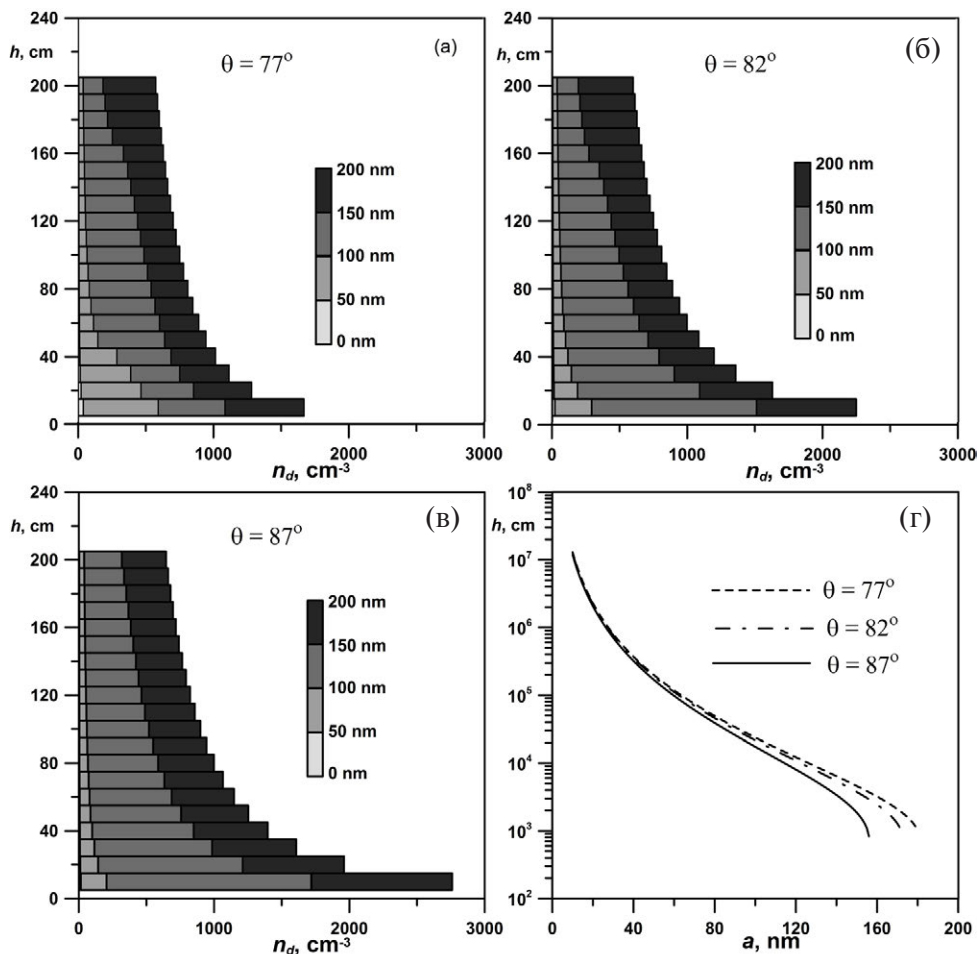
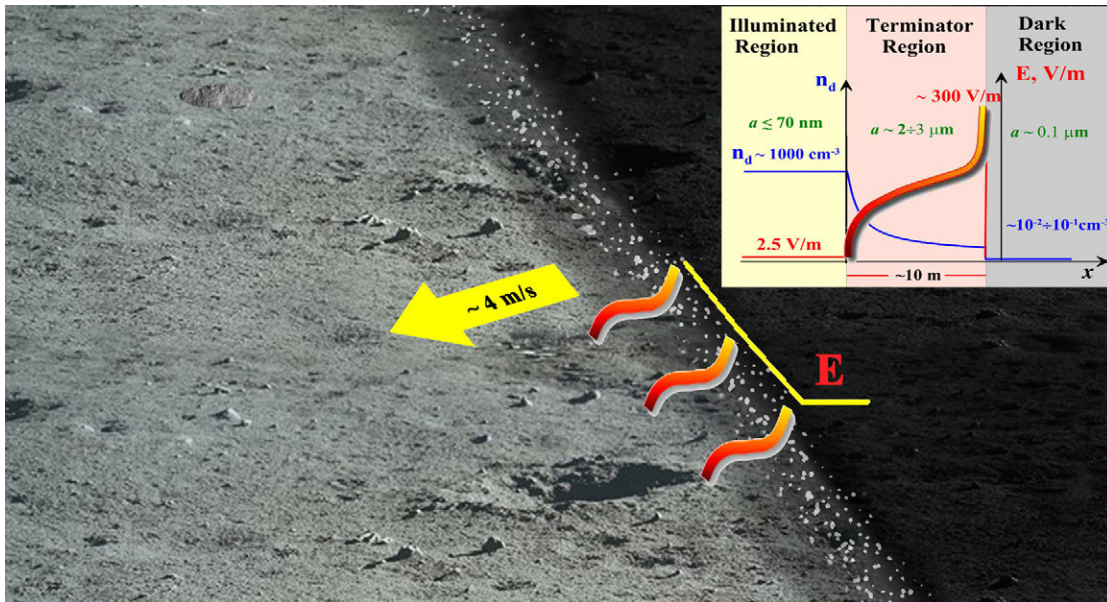


Рис. 8. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений  $\theta = 77^\circ$  (а),  $82^\circ$  (б),  $87^\circ$  (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для  $N_0 = 1.3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 1.3$  эВ.



**Рис. 9.** Движение терминатора вдоль лунной поверхности. Красно-желтые кривые на основной части рисунка характеризуют профили электрического поля  $E$  в области терминатора. На вставке, расположенной в правом верхнем углу, представлены концентрация пылевых частиц (синяя кривая) и электрическое поле (красно-желтая кривая) в окрестности лунного терминатора. Невозмущенные зоны соответствуют освещенной (Illuminated Region) и темной (Dark Region) областям Луны. Зона между ними представляет собой плазменную возмущенную область, связанную с терминатором (Terminator Region).

[26] количество соударений метеороидов с единицей площади лунной поверхности в единицу времени по порядку величины равно  $N_i \approx 100 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ . Большинство ударников имеют субмикронный и микрометровый размер. Значение средней скорости ударников приблизительно равно  $\langle u_i \rangle \approx 27 \text{ км/с}$ .

Рассмотрение соударений высокоскоростных метеороидов с лунной поверхностью проводится в предположении, что удельная энергия ударника  $u_i^2 / 2$  значительно превосходит энергию связи атомов и молекул в ударнике и лунном реголите. Предположение о том, что энергия связи атомов и молекул в ударнике и лунном реголите пренебрежимо мала по сравнению с удельной энергией ударника оправдано, поскольку энергия связи обычно имеет порядок  $10 \text{ МДж/кг}$ , тогда как удельная энергия ударника  $u_i^2 / 2 \sim \langle u_i \rangle^2 / 2 \approx 360 \text{ МДж/кг}$ . При соударении высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью происходит сильное сжатие и нагрев вещества ударника и мишени. В результате воздействия высокого давления образуется сильная ударная волна, распространяющаяся (и ослабевающая при движении) от эпицентра удара. В конечном итоге, ослабевшая ударная волна трансформируется в линейную звуковую волну.

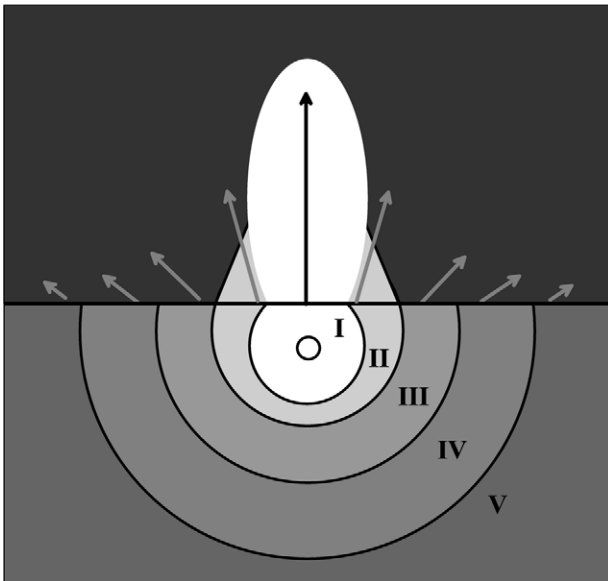
Вычисления проводятся для ситуации, когда ударник состоит из сплошного габброидного анортозита, тогда как веществом мишени является пористый габброидный анортозит. Предполагается, что плотности ударника и мишени до соударения соответственно равны  $\rho_{i0} = 3$  и  $\rho_{t0} = 1.4 \text{ г/см}^3$ . Пористость мишени —  $k = \rho_{i0} / \rho_{t0} = 2.14$ . Также предполагается линейная зависимость между скоростью сильной ударной волны  $D_{i,t}$  и массовой скоростью  $u$  за ударно-волновым фронтом:  $D_{i,t} = C_{i,t} + S_{i,t}u$ . Здесь индексы  $i, t$  характеризуют вещество соответственно ударника и мишени,  $C_i = 7.71 \text{ км/с}$ ,  $S_i = 1.05$ ,  $C_t = C_i k / (1 + S_i(k - 1)) = 7.51 \text{ км/с}$ ,  $S_t = S_i k / (1 + S_i(k - 1)) = 1.02$ . Скорость ударной волны и массовая скорость однозначно определяют уравнение состояния через хорошо известные уравнения Гюгоню. Линейная зависимость между указанными скоростями обычно достаточно хорошо описывает экспериментальные данные (см. [41]).

В результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва, расположенного на глубине  $W_0$  под поверхностью, формируются зоны, характеризующие происходящие при этом процессы: зона испарения



вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), а также зона нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), характеризующаяся значениями давления в нелинейной звуковой волне, меньшими динамического предела упругости (рис. 10). За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная.

Полагая скорость звука в невозмущенном реголите равной  $c_0 = 300$  м/с, а плотность верхнего слоя реголита —  $\rho_{r0} \approx 1.4$  г/см<sup>3</sup>, и анализируя распространение ударной волны, можно определить радиусы внешних границ I, II, III и IV зон под лунной поверхностью:  $r_I \approx 0.31u_i^{2/3}a_i$ ,  $r_{II} \approx 0.58u_i^{2/3}a_i$ ,  $r_{III} \approx 0.93u_i^{2/3}a_i$ ,  $r_{IV} \approx 1.3u_i^{2/3}a_i$ , где  $a_i$  — радиус ударника, а скорость  $u_i$  вычисляется в км/с.



**Рис. 10.** Схема, характеризующая формирование под лунной поверхностью зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), зоны нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), зоны линейных упругих деформаций вещества реголита (V). Круг в зоне (I) представляет невозмущенный метеороид, расположенный в эквивалентном центре метеороидного взрыва. Стрелки характеризуют выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны из зон I–V. Теми же цветами (соответственно белым и светло-серым), что и соответствующие зоны (I) и (II), показаны выбросы вверх испаренного и расплавленного вещества.

На основе вычислений скорости и количества вещества, поднимающегося над поверхностью Луны и происходящего из различных зон, удается сформулировать следующие выводы:

1) масса пылевых частиц, происходящих из зоны V линейных упругих деформаций вещества реголита и поднимающихся над поверхностью Луны на высоты, большие 10 м (1 км), в 80 раз (6 раз) превосходит массу поднимающегося вещества, происходящего из других зон (I–IV);

2) масса пылевых частиц, происходящих из зон IV и V упругих деформаций и поднимающихся над поверхностью Луны на высоты, большие 10 км, в 4 раза превосходит массу поднимающегося вещества, происходящего из зон I–III;

3) только материал из зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), а также зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III) может достигнуть высот 100 км над поверхностью Луны и выше;

4) высота 700 км достигается только материалом, выбрасываемым ударной волной из зоны испарения вещества (I) и зоны плавления вещества (II).

Кроме того, наиболее важной зоной с точки зрения образования пылевого облака над поверхностью Луны является зона плавления вещества (II). Действительно, на границе между зонами II и III скорость выброса вещества определяется соотношением  $u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx 1.5$  км/с, тогда как на границе между зонами I и II скорость выброса вещества  $u_v = \sqrt{2E_{cv}} \approx 6$  км/с. Здесь  $E_{cmt} \approx 1.1$  МДж/кг — удельная пороговая внутренняя энергия полного плавления сплошного габброидного анортозита,  $E_{cv} \approx 18$  МДж/кг — удельная пороговая внутренняя энергия полного испарения (в условиях быстрой адиабатической механической разгрузки). Таким образом, только капли, образующиеся в зоне плавления вещества (II), обладают скоростями в диапазоне от первой до второй космической скорости (для Луны), т. е. от 1.68 до 2.38 км/с. Только такие капли могут совершать финитное движение вокруг Луны.

В результате метеороидного удара первоначально пористый реголит сжимается образующейся ударной волной до плотностей сплошного вещества и приобретает форму сферической оболочки, движущейся за ударной волной от эквивалентного центра метеороидного взрыва.

Если при выходе ударной волны на свободную поверхность давление за фронтом волны оказывается большим порогового давления полного плавления, но при этом меньшим порогового давления полного испарения, то в результате разлета и быстрой механической разгрузки ударно сжатый материал оказывается полностью расплавленным (зона II). После выхода ударной волны на свободную поверхность оболочка выбрасывается в свободное пространство находящимся позади нее расширяющимся паром. Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты. Равновесные капли образуются, когда в капельно-паровом потоке объем, занимаемый паром, становится сопоставимым с объемом жидкости. Согласно [28], равновесное значение радиуса капли (при  $t \rightarrow \infty$ ), образованной (вследствие удара метеороида) в зоне плавления вещества (II), имеет вид

$$a_d \approx 1.5 \cdot 10^{-4} a_i^{1/2}, \quad (3)$$

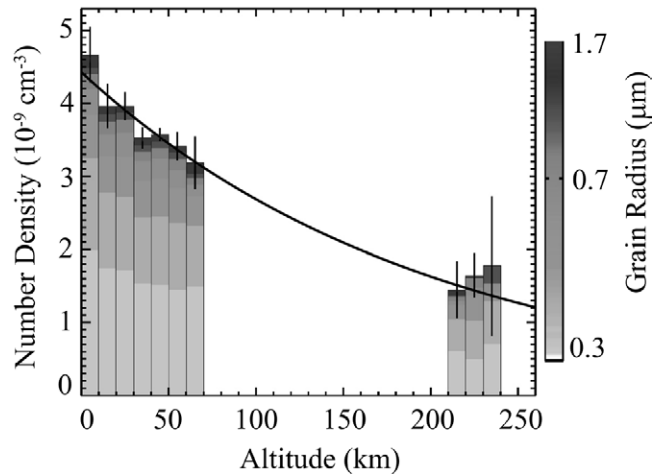
где  $a_d$  и  $a_i$  вычисляются в см.

В табл. 2 представлены результаты вычисления вклада в поток  $F_d$  на больших высотах, вносимого каплями различных размеров [28]. Используя данные из таблицы, а также характерное значение скорости капель  $v_d \geq u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx 1.5$  км/с, можно оценить концентрацию капель с размерами  $300 \text{ нм} \leq a_d \leq 1 \text{ мкм}$  на больших высотах над лунной поверхностью:  $n_d \lesssim 10^{-8} \text{ см}^{-3}$ . Данный результат соответствует [28] наблюдаемой в рамках миссии LADEE концентрации пылевых частиц в облаке, которая находится в диапазоне  $(0.4\text{--}4) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$  (рис. 11).

Следует отметить [28], что в рамках миссии LADEE было обнаружено скачкообразное возрастание концентрации пыли во время взаимодействия некоторых из ежегодных метеорных потоков с Луной. Особенно данный эффект проявлялся во время высокоскоростного метеорного потока Геминиды. Все это указывает на связь между

**Таблица 2.** Потоки  $F_d(a_{dmin}, a_{dmax})$  капель с размерами в диапазонах  $a_{dmin} \leq a_d \leq a_{dmax}$ .

$a_{dmin}$ , нм	$a_{dmax}$ , нм	$F_d(a_{dmin}, a_{dmax})$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
	100	0.27
	300	0.06
	1000	0.002



**Рис. 11.** Концентрации пылевых частиц различных размеров на разных высотах от поверхности Луны. Сплошная линия, проходящая через верхи столбиков концентрации (представляющих собой данные, полученные в рамках миссии LADEE), характеризует эмпирическое соотношение  $n_d = 4.43 \exp(-h/200) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$  [28], где высота  $h$  измеряется в км.

процессами формирования пылевого облака и соударениями метеороидов с поверхностью Луны.

## 5. ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РАМКАХ МИССИИ “ЛУНА-25”

Несмотря на то, что спускаемому аппарату “Луна-25” не удалось осуществить мягкую посадку, во время полета космического аппарата по окололунной круговой орбите было проведено несколько включений научной аппаратуры, созданной в Институте космических исследований Российской академии наук. Анализируя данные наблюдений, специалисты ИКИ РАН получили, в частности, следующие результаты:

1) в энергетическом спектре гамма-лучей нейтронный и гамма-спектрометр АДРОН-ЛР зарегистрировал наиболее интенсивные линии химических элементов лунного грунта;

2) впервые на окололунной орбите был включен ионный энерго-масс-анализатор АРИЕС-Л, предназначенный для изучения приповерхностной ионной экзосферы в приполярной области Луны. Полученные данные позволили выбрать оптимальный режим работы прибора на поверхности Луны для измерения энергетических спектров частиц в диапазоне энергий от 10 до 3000 эВ;

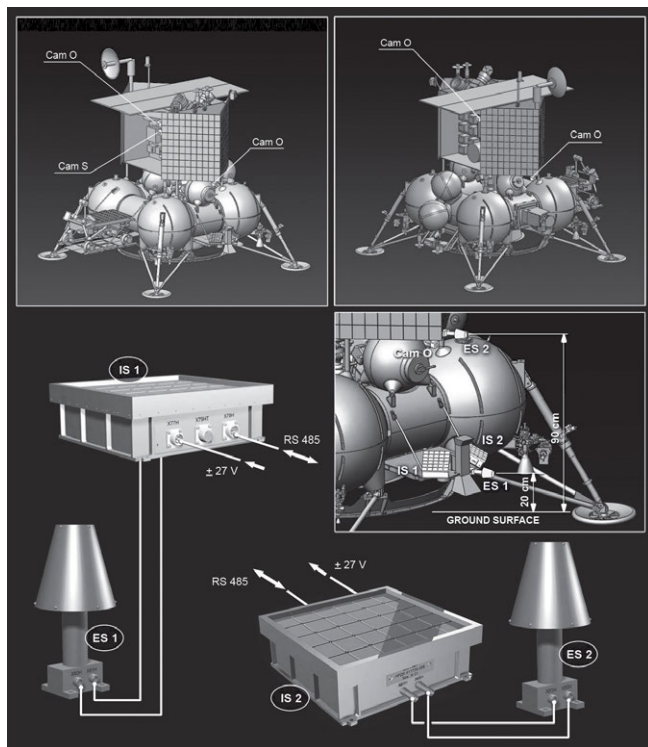
3) прибор “Пылевой мониторинг Луны” (ПМЛ) [30], предназначенный для регистрации пылевых

частиц, левитирующих у поверхности Луны, и определения параметров окружающей плазмы, зарегистрировал несколько событий, связанных с ударами пылевых частиц о поверхность прибора.

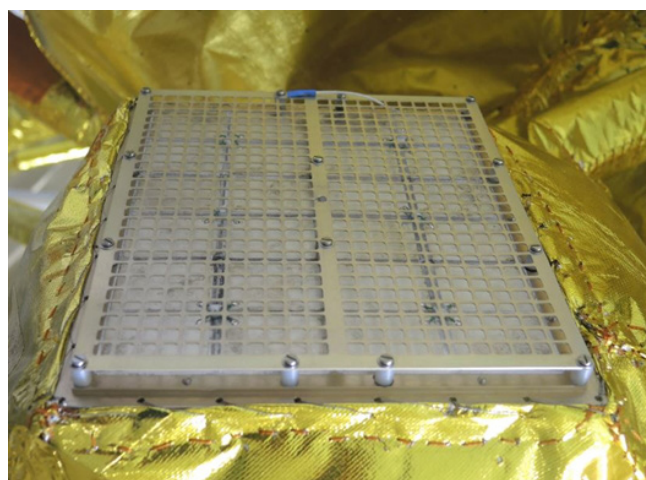
Прибор ПмЛ предназначен для исследования динамики пылевых частиц вблизи поверхности Луны и исследования факторов, характеризующих их динамику. Регистрироваться могут микрометеорные частицы, вторичные частицы, выбитые с поверхности в результате микрометеорного удара, а также пылевые частицы лунного реголита, поднятые с поверхности Луны под действием электростатических сил. Кроме того, прибор включает датчики параметров окружающей плазмы, по результатам которых можно будет оценить величину приповерхностного электрического поля. Прибор ПмЛ включает три блока (рис. 12): блок ударных сенсоров (IS) и два электростатических датчика (ES1 и ES2). В блоке IS для регистрации пылевых частиц над поверхностью Луны использованы пьезокерамические пластины (ПКП) и зарядочувствительная сетка

(ЗЧС), расположенная перед пластинами. Ниже в данном разделе приводится описание данных, полученных прибором ПмЛ.

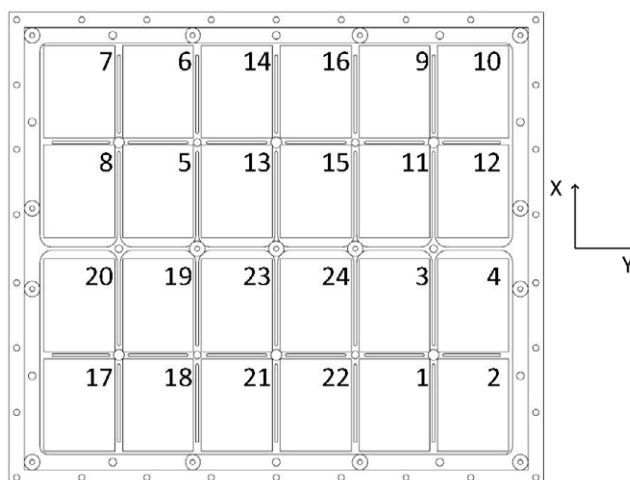
За время нахождения космического аппарата “Луна-25” на орбите Луны прибор ПмЛ был включен два раза и проработал суммарно около 80 мин (при этом данные за последние 40 мин работы не были получены в полном объеме). Устройство задействованной в получении данных на орбите Луны части прибора ПмЛ следующее. Ударный сенсор (УС) прибора ПмЛ (рис. 13) содержит пьезоэлектрические датчики (пьезокерамика ЦТС19), расположенные на верхней грани блока в количестве  $6 \times 4$  штук (рис. 14). Датчики преобразовывают механический импульс пылевой частицы, попавшей в такой датчик, в электри-



**Рис. 12.** Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станции “Луна-25”. Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O).



**Рис. 13.** Фотография блока ударного сенсора прибора ПмЛ, установленного на аппарате “Луна-25”.



**Рис. 14.** Расположение и нумерация пьезоэлектрических датчиков на верхней грани блока ударного сенсора прибора ПмЛ.



ческий сигнал [30]. Также датчики способны уловить сигналы от механической волны частицы, попавшей в корпус прибора, в таком случае сигнал должен быть зафиксирован одновременно несколькими датчиками, при этом форма сигнала должна отличаться от “классической”, т. е. формы сигнала, получаемой от прямого попадания частицы в пьезокерамику.

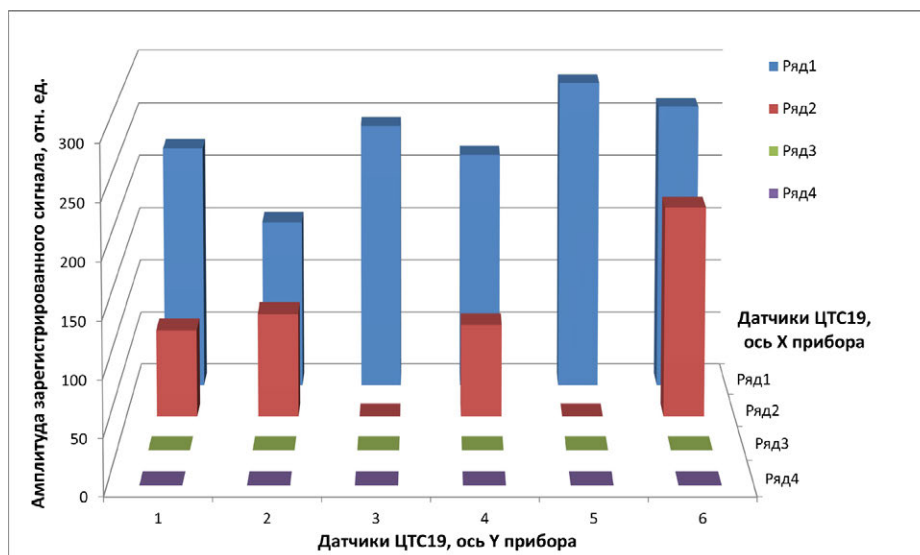
В ходе первого включения (длительностью 41 минута 32 секунды), состоявшегося 17 августа 2023 г. в 12:46:20 Мск, пьезоэлектрические датчики блока УС прибора ПмЛ зафиксировали некоторое количество сигналов над уровнем шума. Одну группу из таких сигналов с большой степенью достоверности можно интерпретировать как сигнал от частицы, попавшей в корпус прибора (либо экранно-вакуумной теплоизоляции космического аппарата вблизи прибора) и вызвавшей одновременное срабатывание датчиков блока УС, расположенных со стороны попадания частицы в корпус. Диаграмма (“карта”) срабатываний приведена на рис. 15.

Исходя из наибольшей амплитуды первого события, минимально возможный импульс частицы-импактора составляет  $1.3 \times 10^{-9}$  Н·с. Частица, таким образом, может происходить из описанного в предыдущем разделе плазменно-пылевого облака, т. е. потенциальным “родителем” частицы может быть поверхность Луны. В этом случае скорость частицы по отношению к космическому аппарату должна быть около 4.8 км/с.

Кроме того, возможным источником частицы может быть высокоскоростной метеорный поток Персеиды, который автоматической станции “Луна-25” удалось успешно пересечь во время перелета к Луне. Тогда возможная скорость соударения с космическим аппаратом возрастает приблизительно до 55–60 км/с. В первом случае частица, которая могла бы вызвать такой сигнал, обладает массой не меньшей, чем  $m_m = 2.71 \times 10^{-13}$  кг, а во втором случае — чем  $m_p = 2.17 \times 10^{-14}$  кг. Для частиц с плотностью  $\rho = 3500$  кг/м<sup>3</sup> диаметр зафиксированной частицы мог бы составлять  $d_m = 5.3$  мкм в случае ее лунного происхождения и  $d_p = 2.3$  мкм в случае, если частица связана с потоком Персеид.

## 6. НЕОБХОДИМОСТЬ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРИБОРА ПМЛ НА ПОСАДОЧНОМ АППАРАТЕ “ЛУНА-27”

В соответствии с российской космической программой в ближайшие десятилетия планируются дальнейшие комплексные исследования Луны. В частности, ожидается реализация проекта, включающего посадку на Луну спускаемого аппарата “Луна-27”. Основной целью этой экспедиции является детальное исследование полярных областей Луны. Среди широкого круга научных задач, стоящих перед этим посадочным аппаратом, стоит задача изучения динамики пылевой компоненты приповерхностной экзосферы Луны. Во время орбитального (вокруг Луны) полета “Луны-25” прибор ПмЛ зарекомендовал



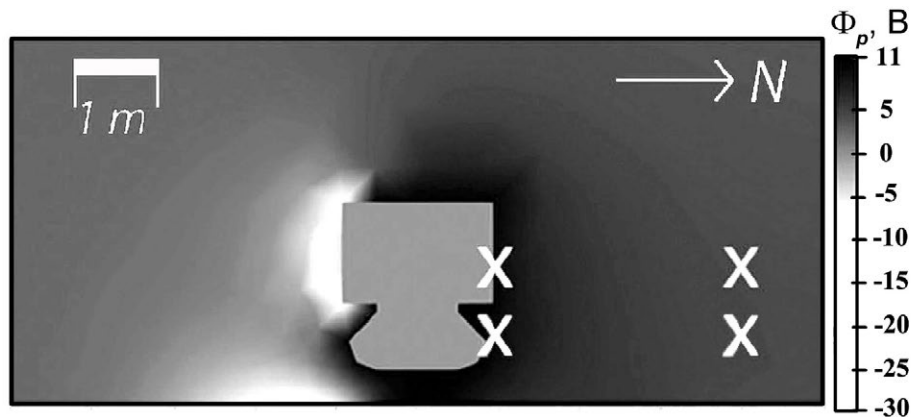
**Рис. 15.** Амплитуды сигналов пьезоэлектрических датчиков с привязкой к расположению датчиков прибора, выраженные в относительных единицах. Сигналы зафиксированы в ряду 1 (датчики 7, 6, 14, 16, 9, 10) и ряду 2 (датчики 8, 5, 15, 12).

себя с самой лучшей стороны. Однако на посадочном аппарате “Луна-27” будет установлен усовершенствованный вариант прибора ПмЛ. Это связано, в частности, с тем, что на посадочном аппарате “Луна-25” не было возможности установить штангу для размещения электростатических датчиков на достаточном удалении от аппарата, что желательно для уменьшения возмущений окружающей плазмы и приповерхностного электростатического поля из-за влияния посадочного аппарата.

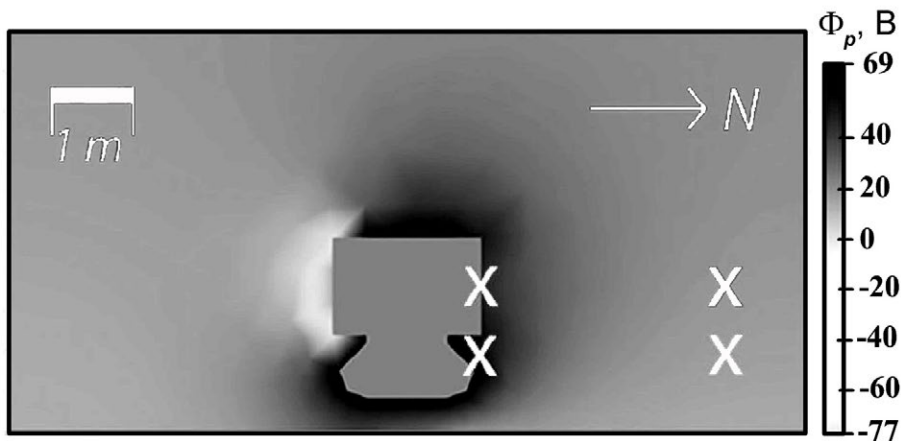
Для оценки степени влияния посадочного аппарата на измеряемые параметры окружающей плазмы и приповерхностного электрического поля было выполнено компьютерное моделирование динамики пылевых частиц вблизи поверхности Луны и влияния на эту динамику посадочного

аппарата [42]. Моделирование выполнялось методом “частиц в ячейках” (PIC) [43] с использованием программного обеспечения SPIS-DUST (Spacecraft Plasma Interaction Software) [44]. При моделировании были использованы ожидаемые параметры плазмы в приповерхностной зоне Луны, находящейся в условиях солнечного ветра. При этом учитывалась также реальная конфигурация посадочного аппарата “Луна-27” и планируемое место посадки [42].

Результаты компьютерного моделирования электростатического потенциала вблизи поверхности Луны с учетом влияния на него посадочного аппарата приведены на рис. 16 и 17 для дневных условий, соответствующих расположению Солнца в  $22^\circ$  и  $11^\circ$  над горизонтом. Достаточная малость углов, характеризующих расположение Солнца,



**Рис. 16.** Результаты численного моделирования распределения потенциала плазмы  $\Phi_p$  в окрестностях посадочного аппарата на поверхности Луны в условиях, когда Солнце находится в  $22^\circ$  над горизонтом. Моделирование осуществлено с использованием программы SPIS-DUST. Шкала величины потенциала плазмы в вольтах представлена на рисунке справа. Направление на Солнце показано стрелкой. Знаком “X” отмечены положения датчиков ES1 (снизу) и ES2 (сверху) вблизи посадочного аппарата, для случая, если бы осуществилась удачная посадка “Луны-25”, так и на удалении (3 м от посадочного аппарата), для ситуации, если бы датчики крепились на длинной штанге (случай “Луны-27”).



**Рис. 17.** То же, что и на рис. 16, но для условий, когда Солнце находится в  $11^\circ$  над горизонтом.

обусловлена тем, что место посадки спускаемого аппарата “Луна-27” ожидается вблизи Южной полярной области Луны.

На рис. 16, 17 видны значительные возмущения плазменного окружения вблизи посадочного аппарата. С подсолнечной стороны потенциал посадочного аппарата положительный и соответствует  $\sim 10$  В. Эти возмущения заметны на расстояниях до  $\sim 1$  м от корпуса посадочного аппарата. По этой причине посадочный аппарат “Луна-27” будет оснащен штангой с расположенными на ней датчиками параметров плазмы.

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, особенностью окололунного пространства является наличие плазменно-пылевой системы. Эта система является важным объектом современных исследований Луны. В работе приведен краткий обзор по теоретическим исследованиям окололунной пылевой плазмы. Затронуты, в частности, проблемы формирования пылевой плазмы над Луной, важными факторами которых являются электростатические процессы и удары микрометеороидов о ее поверхность. Рассмотрены свойства пылевой плазмы в области лунного терминатора. Впервые представлено описание данных наблюдений пылевых частиц в окрестностях Луны, полученных в рамках миссии “Луна-25”. Показано, что имеется, по крайней мере, одно достоверное наблюдение пылевой частицы либо имеющей лунное происхождение, либо связанной с высокоскоростным потоком Персеиды. Проведено обсуждение необходимости усовершенствования прибора “Пылевой мониторинг Луны” на посадочном аппарате “Луна-27”. Усовершенствование связано с необходимостью установки штанги для размещения электростатических датчиков на достаточном удалении от аппарата, что желательно для уменьшения возмущений окружающей плазмы и приповерхностного электростатического поля из-за влияния посадочного аппарата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00064, <https://rscf.ru/project/24-12-00064/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norton R.H., Guinn J.E., Livingston W.C., Newkirk G.A., Zirin H. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 815.

2. Rennilson J.J., Criswell D.R. // The Moon. 1974. V. 10. P. 121.
3. Zook H., McCoy J. // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 2117.
4. Severny A.B., Terez E.I., Zvereva A.M. // The Moon. 1975. V. 14. P. 123.
5. Васильев М.Б., Виноградов В.А., Вышков А.С., Ивановский О.Г., Колосов М.А., Савич В.А., Самовол В.А., Самознаев Л.Н., Сидоренко А.И., Шейхет А.И., Штерн Д.Я. // Космические исследования. 1974. Т. 12. С. 115.
6. Vyshlov A.S. // Space Research. V. 16 / Ed. M.J. Muroft. Paris: COSPAR, 1975. P. 945.
7. Elsmore B. // Phil. Mag. Ser. 8. 1957. V. 2. P. 1040.
8. Вышков А.С., Савич Н.А. // Космические исследования. 1978. Т. 16. С. 551.
9. Stubbs T.J., Glenar D.A., Farrell W.M., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Delory G.T. // Planet. Space. Sci. 2011. V. 59. P. 1659.
10. Berg O.E., Richardson F.F., Burton, H. // Apollo 17 preliminary science report. NASA Spec. Publ. 1973. 16-1-16-9. SP-330.
11. Berg O.E., Wolf H., Rhee J. // Interplanetary Dust and Zodiacal Light / Eds. H. Elsasser and H. Fechtig. New York: Springer, 1976. P. 233.
12. Berg O.E., Richardson F.F. // Rev. Sci. Instrum. 1969. V. 40. P. 1333.
13. Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srama R., Szalay J.R., Wright G. // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. P. 93.
14. Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z. // Nature. 2015. V. 522. P. 324.
15. Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 59.
16. Sternovsky Z., Chamberlin P., Horányi M., Robertson S., Wang X. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A10104.
17. Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Попель С.И. // Письма ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 198.
18. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. P. 455.
19. Лисин Е.А., Тараканов В.П., Петров О.Ф., Попель С.И., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Фортвов В.Е. // Письма ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 755.
20. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н., Афонин В.В., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Лисин Е.А., Петров О.Ф. // Письма ЖЭТФ. 2014. Т. 99. С. 131.
21. Буринская Т.М. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 17.
22. Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 123701.



23. *Izyekova Yu.N., Morozova T.I., Popel S.I.* // IEEE Transact. Plasma Sci. 2018. V. 46. P. 731.
24. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M., Dubinskii A.Yu.* // Planet. Space Sci. 2018. V. 156. P. 71.
25. *Popel S.I., Golub' A.P., Kassem A.I., Zelenyi L.M.* // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. P. 013701.
26. *Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // Письма ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 641.
27. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Бережной А.А., Зубко Е.С., Итен М., Лена Р., Спозетти С., Великодский Ю.И., Терещенко А.А., Атаманюк Б.* // Письма ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 379.
28. *Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М.* // Письма ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 594.
29. *Голубь А.П., Попель С.И.* // Астрономический вестник. 2021. Т. 55. P. 393.
30. *Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А., Ляш А.Н., Дубов А.Е., Афонин В.В., Бедняков С.А., Бычкова А.С., Грушин В.А., Докучаев И.В., Карташева А.А., Попель С.И., Шашкова И.А., Шеховцова А.В., Яковлев А.В., Васильев М.М., Лисин Е.А., Петров О.Ф., Борисов Н.Д., Зеленый Л.М.* // Астрономический вестник. 2021. Т. 55. P. 589.
31. *Родэ О.Д., Иванов А.В., Назаров М.А., Цимбальникова А., Юрек К., Гейл В.* // Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. Прага: Академия, 1979.
32. *Колмогоров А.Н.* // ДАН. 1941. Т. 31. С. 99.
33. *Кузнецов В.М.* // Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.
34. *Colwell J.E., Batiste S., Horányi M., Robertson S., Sture S.* // Rev. Geophys. 2007. V. 45. P. RG2006.
35. *Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И.* // ДАН. 2007. Т. 415. С. 247.
36. *Park J., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A.* // J. Aerospace Engineering. 2008. V. 21. P. 266.
37. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M.* // Europ. Phys. J. D. 2014. V. 68. P. 245.
38. *Walbridge E.* // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3668.
39. *Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B.* // Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space / Ed. R.J.L. Grard. Dordrecht: D.Reidel, 1973. P. 389.
40. *Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M., Krag H., Kuiper W.* // Earth Moon Planet. 2008. V. 102. P. 191.
41. *Мелов Г.* // Образование ударных кратеров. М.: Мир, 1994.
42. *Kuznetsov I.A., Hess S.L.G., Zakharov A.V., Cipriani F., Seran E., Popel S.I., Lisin E.A., Petrov O.F., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Kopnin S.I.* // Planetary Space Sci. 2018. V. 156. P. 62.
43. *Харлоу Ф.Х.* // Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
44. *Hess S.L.G., Sarrailh P., Maté o-Vélez J.-C., Jeanty-Ruard B., Cipriani F., Forest J., Hilgers A., Honary F., Thi'bault B., Marple S.R., Rodgers D.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. V. 43. № 9. P. 2799.

## CIRCUMLUNAR DUSTY PLASMA: MAIN PHYSICAL PROCESSES AND EXPERIMENTAL DATA OBTAINED DURING THE “LUNA-25” MISSION

**S. I. Popel<sup>a,\*</sup>, L. M. Zelenyi<sup>a</sup>, A. V. Zakharov<sup>a</sup>, I. A. Kuznetsov<sup>a</sup>, G. G. Dol'nikov<sup>a</sup>, A. N. Lyash<sup>a</sup>, I. A. Shashkova<sup>a</sup>, A. A. Kartasheva<sup>a</sup>, A. E. Dubov<sup>a</sup>, M. E. Abdelaal<sup>a</sup>, and Yu. S. Reznichenko<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: popel@iki.rssi.ru*

A brief review of theoretical studies of circumlunar dusty plasma, the important factors in the formation of which are electrostatic processes and impacts of micrometeoroids on the lunar surface, is given. Observation data of dust particles in the vicinity of the Moon, obtained within the “Luna-25” mission, are described for the first time. It is shown that there is at least one reliable observation of a dust particle either of lunar origin or associated with the high-speed Perseid stream. The need to improve the Lunar Dust Monitor device on the “Luna-27” lander is discussed. The improvement is associated with the need to install a rod for placing electrostatic sensors at a sufficient distance from the device, which is desirable to reduce disturbances of the surrounding plasma and the near-surface electrostatic field because of the influence of the lander.

*Keywords:* dusty plasma, Moon, lunar ionosphere, photoelectrons, levitating dust particles, meteoroids, “Luna-25,” “Luna-27”