

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА НА ЛУНЕ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ

© 2020 г. Л. М. Зеленый^{a, b}, С. И. Попель^{a, c, *}, А. В. Захаров^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

^c Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 14.11.2019 г.

После доработки 19.12.2019 г.

Принята к публикации 19.12.2019 г.

Приводится краткий обзор по пылевой плазме у поверхности Луны, важным фактором при формировании которой являются электростатические процессы. Формулируются проблемы, касающиеся теоретического и численного моделирования плазменно-пылевой системы у Луны, ее экспериментального исследования и интерпретации данных по окололунной пылевой плазме.

Ключевые слова: пылевая плазма, Луна, будущие космические миссии, моделирование

DOI: 10.31857/S0367292120050108

1. ВВЕДЕНИЕ

Особенностью¹ окололунного пространства является наличие плазменно-пылевой системы, что нашло свое отражение в современных лунных исследованиях (см., например, [1–11]). В России готовятся миссии “Луна-25”, “Луна-26”, “Луна-27”, “Luna Sample Return” и т. д. На посадочных модулях станций “Луна-25” и “Луна-27”, а также на орбитальном модуле “Луна-26” предполагается разместить аппаратуру, которая будет исследовать свойства пыли и пылевой плазмы над поверхностью Луны и в лунной экзосфере. Исследования пыли и пылевой плазмы над Луной проводятся также и в зарубежных миссиях, среди которых следует выделить миссию NASA LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”) [12, 13], запущенную в 2013 г. В рамках этой миссии было показано, что вокруг Луны вплоть до высот, по крайней мере, порядка нескольких сот километров присутствует непрерывно существующее облако субмикронной пыли. Разработана стратегическая концепция национальной программы исследования и начального этапа освоения Луны, согласно которой ближай-

шей стратегической задачей отечественной исследовательской космонавтики 21-го века должно стать создание российского плацдарма на поверхности Луны для обеспечения условий создания в будущем Российской Лунной Станции.

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 [14]. Объяснение этого эффекта обычно связывают [15, 16] с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах.

Астронавты, участвующие в полетах космических кораблей Аполлон к Луне, использовали визуальные наблюдения для того, чтобы сделать вывод о существовании субмикронной пыли вплоть до высот около 100 км. В рамках измерений, проводимых с помощью астрофотометра на борту “Лунохода-2”, также предполагалось, что частицы пыли над поверхностью Луны рассеивают свет [17]. 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 экс-

¹ Доклад с таким же английским названием (Dusty Plasma at the Moon. Challenges of Modeling and Measurements) был представлен на международной научной конференции “Advances and Applications in Plasma Physics” (Saint Petersburg, Russia, 2019). Поэтому здесь авторы считают необходимым наряду с русским дать и оригинальное английское название доклада.

педиций “Луна-19” и “Луна-22” по определению концентрации электронов над Луной посредством метода радиозатменных измерений [18, 19]. 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 [20, 21]. Столь высокие концентрации электронов могут быть обусловлены присутствующими на больших высотах над Луной заряженными пылевыми частицами [3].

Первое непосредственное обнаружение пылевых частиц над поверхностью Луны относится к эксперименту LEAM (Lunar Ejecta and Meteorite), который был проведен астронавтами в рамках миссии “Аполлон-17” на поверхности [22, 23]. 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 [24].

В рамках миссии NASA LADEE 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 измерить 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 удара в минуту для частиц с зарядами $q > 0.5$ и $q > 5 \text{ фКл}$, которые соответствуют размерам частиц $a > 0.3$ и $a > 0.7 \text{ мкм}$. Измерения, проведенные с помощью установки LDEX, обнаруживают присутствие разреженного, но устойчиво суще-



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

ствующего облака небольших пылевых частиц с радиусами от <0.3 до $>0.7 \text{ мкм}$.

Лунная пыль представляет собой существенный фактор риска как для пилотируемых лунных миссий, так и для функционирования будущей лунной станции. В частности, лунная пыль за счет адгезии прилипает к скафандрам (см. рис. 1), поверхностям космических аппаратов, приборам и т.п., что может угрожать работе систем. Так, в частности, на поверхностях приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения. В результате, приборы могут слишком нагреваться. Пыль воздействует на здоровье космонавтов. Так, из-за прилипания пыли к скафандрам, пыль попадает внутрь лунного модуля после возвращения в него космонавтов. Весь обратный путь на Землю или же во время пребывания их на лунной станции космонавты могут вдыхать лунную пыль, которая в состоянии невесомости присутствует в воздухе модуля.

Считается, что на освещенной стороне Луны ее поверхность заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит

также их испускание пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли. Согласно результатам исследований [5] характерный размер a и характерная концентрация n_d заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются значениями порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} соответственно. Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе, фотоэлектронов, выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхностей парящих пылевых частиц). Над темной частью Луны фотоэлектроны отсутствуют. Концентрация заряженной пыли оценивается при этом из соотношения $n_d \sim n_{e,S}/|Z_d|$, 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 $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$.

Описанные выше электростатические процессы являются важным фактором формирования плазменно-пылевой системы над лунной поверхностью. Кроме того, определенный вклад в формирование плазменно-пылевой системы над поверхностью Луны вносят удары метеороидов [25–27]. Учет микрометровых пылевых частиц, образованных вследствие ударов метеороидов, должен учитываться при описании процесса рассеяния солнечного света на пылевых частицах над областью лунного терминатора для объяснения свечения над этой областью, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor. Отличительными особенностями частиц, появляющихся в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны вследствие ударов метеороидов, являются высокие скорости (большие 10 м/с) и микрометровые размеры.

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 физико-математической модели подъема и динамики за-

ряженных пылевых частиц над лунной поверхностью. В разделе 4 обсуждается влияние космического аппарата на плазменно-пылевую систему. Список имеющихся проблем приведен в разделе 5 статьи.

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, [5]), либо вследствие ударов метеороидов [25–27]. Лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стеклов, литифицированных брекчий, фрагментов метеороидов и т. д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами оплавления и спекания. На рис. 2 представлены примеры фотографий [28] 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 вариабильность формы слагающих реголит частиц их распределение на поверхности Луны удовлетворяет логарифмически-нормальному закону (распределению Колмогорова), что оказывается типичным для случая многократного дробления [29]. 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 размерам 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 [30].

Итак, для описания распределения по размерам частиц, составляющих лунный реголит, используем формулу Колмогорова, характеризующую материалы, сформированные в результате многократного дробления породы

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

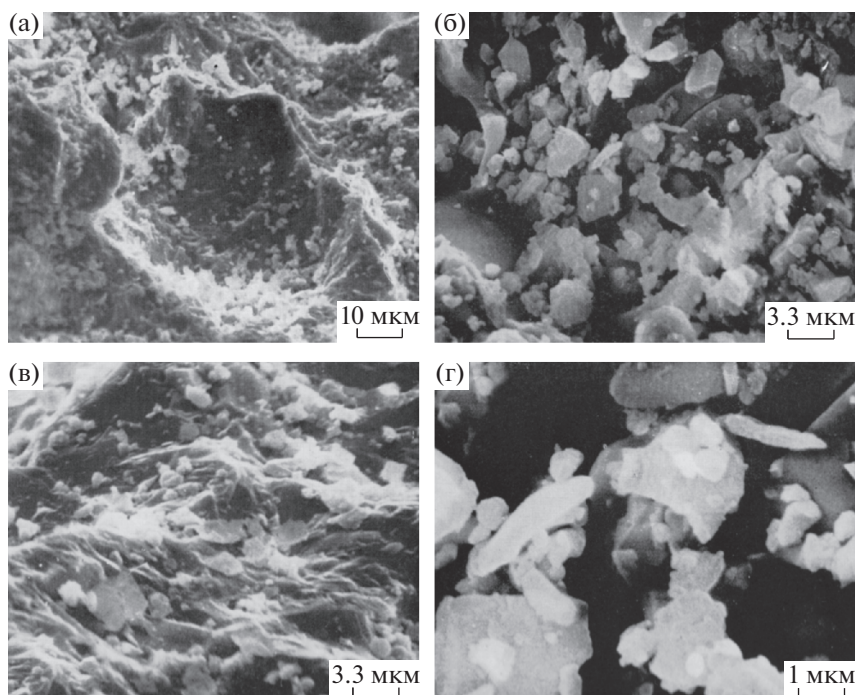


Рис. 2. Примеры фотографий [28] мелкодисперсных частиц различной природы, содержащихся в лунном грунте (“Луна-16”): участок поверхности морского базальта, содержащий мелкие частицы; виден относительно глубокий ударный кратер, воронка которого имеет заметные следы оплавления (а); типичный участок поверхности морского базальта; хорошо заметен его неровный мелкобугорчатый рельеф, обусловленный мелкозернистой структурой породы и характером поверхности слагающих его минеральных зерен (б); характер поверхностной структуры агглютината (в); увеличенное изображение центральной части рис. 2в, демонстрирующее вариабильность формы и размера слагающих агглютинат зерен (г).

где $t = (\ln a - \ln(a_K))/\sigma_K$, a – размер частицы, a_K и σ_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 экспериментальными данными. Например, в работе [31] приведены данные по размерам частиц пыли на поверхности Луны в диапазоне от 20 до 500 мкм. На рис. 3 представлены теоретическое распределение Колмогорова (для параметров $a_K = 61.56$ мкм, $\sigma_K = 1.29$), описывающее данные наблюдений [31], 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 [32] 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 [31] распределение пылевых частиц лун-

ной поверхности в сторону меньших размеров вплоть до размеров порядка 100 нм. Справедливость логнормального распределения для нанометровых частиц лунного реголита подтверждается данными работы [33].

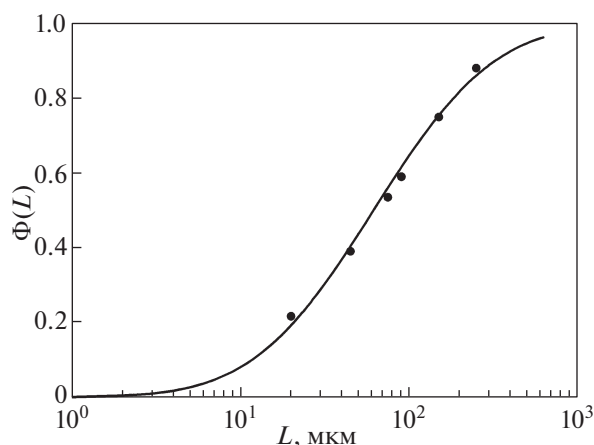


Рис. 3. Теоретическое распределение Колмогорова [32], описывающее данные наблюдений пылевых частиц на поверхности Луны (сплошная кривая). Точки соответствуют данным, приведенным в работе [31].

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛИ НАД ОСВЕЩЕННОЙ ЧАСТЬЮ ЛУНЫ

Вычисление распределений пыли и электронов в приповерхностном слое освещенной части Луны производится на основе теоретической модели [5], которая описывает динамику невзаимодействующих пылевых частиц, а также их зарядку

$$m_d \frac{d^2 h}{dt^2} = q_d E(h, \theta) - m_d g_M, \quad (2)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \quad (3)$$

где h – высота над лунной поверхностью; m_d – масса пылевой частицы; q_d – ее заряд; g_M – ускорение свободного падения у поверхности Луны; E – одномерное (вертикальное) электрическое поле, вычисляемое на основе уравнения Пуассона; θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце; $I_e(q_d)$ и $I_i(q_d)$ – микроскопические токи на пылевую частицу электронов и ионов солнечного ветра, $I_{ph}(q_d)$ – фототок электронов с пылевой частицы, обусловленный ее взаимодействием с солнечным излучением, $I_{e,ph}(q_d)$ – ток фотоэлектронов на пылевую частицу

$$I_e \approx -\pi a^2 n_{eS} \sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{eS}} \right), \quad (4)$$

$$I_i \approx \pi a^2 n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left\{ \frac{u_i + u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i - u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) + \frac{u_i - u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i + u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) \right\} + \pi a^2 n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{4m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \times \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{u_i + u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{u_i - u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) \right\} \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{a T_{iS}} + \frac{u_i^2}{u_{Ti}^2} \right), \quad (5)$$

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

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

Здесь a – размер пылевой частицы, Z_d – ее зарядовое число ($q_d = Z_d e$), e – элементарный заряд, $n_{e(i)S}$ – концентрация электронов (ионов) солнечного ветра, $T_{e(i)S}$ – температура электронов (ионов) солнечного ветра, $m_{e(i)}$ – масса электрона (иона), $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2 / a m_i}$, $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS} / m_i}$ – тепловая скорость ионов солнечного ветра, u_i – скорость солнечного ветра, N_0 – концентрация фотоэлектронов от поверхности Луны при $h \rightarrow 0$, $n_{e,ph}$ – концентрация фотоэлектронов, учитывающая фотоэлектроны как с поверхности Луны, так и с

поверхностей пылевых частиц, $T_{e,ph}$ – температура фотоэлектронов. Выражения (4)–(7) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Выражение (6) для тока I_{ph} не содержит множителя, содержащего характеристики спектров излучения, что оказывается возможным в ситуации, когда поверхности пылевых частиц и поверхность Луны имеют одинаковую работу выхода. В этой ситуации указанный множитель удастся выразить через значение N_0 . Выражение (5) выведено специально для случая положительного заряда пылевых частиц и произвольных скоростей потоков ионов [34].

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). 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 [31] в диапазоне размеров частиц пыли на поверхности Луны от 20 до 500 мкм (см. рис. 3). Полученное таким образом распределение пылевых частиц над Луной по размерам имеет вид

$$dN_d \approx \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_K a^4} \exp\left\{-\frac{[\ln(a) - \ln(a_K)]^2}{2\sigma_K^2}\right\} \times \frac{da}{\tau_{\max} \sqrt{4Z_d(h, \theta)(T_{e,ph}/m_d) \ln\left[1 + \sqrt{\cos\theta/2}(h/\lambda_D)\right] - 2hg_M}}. \quad (8)$$

Здесь

$$\tau_{\max} = \int_0^{H_{\max}} \frac{dh}{\sqrt{4Z_d(h, \theta)(T_{e,ph}/m_d) \ln\left[1 + \sqrt{\cos\theta/2}(h/\lambda_D)\right] - 2hg_M}}, \quad (9)$$

где H_{\max} – максимальная высота подъема частицы пыли с размером a ; $A \approx 8.48 \times 10^{-4}$ см, $a_K = 61.56$ мкм, $\sigma_K = 1.29$ (для данных [31]); $\lambda_D = \sqrt{T_{e,ph}/4\pi N_0 e^2}$.

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 [7, 35]. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям определяется стандартным образом [36] 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 [7]. Типичные значения работы выхода W для лунного реголита варьируются в пределах 5–6 эВ.

Квантовый выход, 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 [36, 37]. Наиболее вероятный квантовый выход вещества лунной поверхности, приведенный в [36] (рис. 11), может быть аппроксимирован следующим образом:

$$Y(E_{ph}) = 0, \quad E_{ph} < 6, \\ Y(E_{ph}) \approx 0.02 + 0.06(E_{ph} - 6), \quad 6 \leq E_{ph} \leq 9, \quad (10) \\ Y(E_{ph}) \approx 0.2, \quad E_{ph} \geq 9.$$

Здесь энергия фотона E_{ph} выражается в эВ; подразумевается, что работа выхода $W = 6$ эВ. Квантовый выход, полученный в [37], является результатом экспериментального исследования, выполненного на образцах лунной пыли, доставленных на Землю в миссиях Аполлон-14 и -15. Зависимость квантового выхода [37] существенно отличается от теоретической (полуэмпирической) зависимости (10). Прежде всего, максимальное значение квантового выхода [37], приблизительно равное 0.09 ± 0.003 , достигается при длине электромагнитной волны, приблизительно равной 900 \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 существенно 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 [7] при $\cos\theta = 1$ (здесь θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце), в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности, соответствующей солнечной вспышке класса X28 (столбец I), солнечному максимуму (столбец II) и солнечному минимуму (столбец III), и различных значений квантового выхода (строки, характеризующие индексом “Y1” в N_0 и T_e соответствуют квантовому выходу (10), а индексом “Y2” – квантовому выходу из работы [37]). Из табл. 1 видно, что существенная разница в значениях квантового выхода [36] и [37] 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 [36] и [37] также существенно более сильно сказываются на расче-

тах, 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 [36, 37] 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 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 Н 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. 4 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 (10) (работа выхода $W = 6$ эВ) и различным уровням солнечной активности [7]. 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 Н Лайман-альфа в спектре солнечного излучения и имеющих температуру порядка 1 эВ. 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.

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

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

Отличие от максвелловского распределения еще более существенно для функций распределения, вычисленных для значений квантового выхода из работы [37] (см. рис. 5) [7]. При этом относительное количество электронов с энергиями порядка 1 эВ оказывается существенно большим, чем в первом случае, характеризуемым квантовым выходом (10). 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 [37]) наблюдать 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 (10), оказывается даже больше, чем эта величина во втором случае. Причиной являются значения квантового выхода, которые даже в максимуме кривой, представленной в [37], не превосходят значений, определяемых выражением (10) для соответствующих энергий фотонов.

К сожалению, значения квантового выхода в работах [36, 37] 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 [7].

Зависимость концентрации фотоэлектронов $n_{e,ph}$ как функции высоты h исследовалась численными методами в диапазоне углов θ от 0 до 89° [5]. Оказалось, что эта зависимость с хорошей точностью может быть описана формулой

$$n_{e,ph}(h) \approx N_0 \frac{\cos \theta}{[1 + \sqrt{\cos \theta / 2} (h / \lambda_D)]^2} + N_e (h / h_1)^p, \quad (11)$$

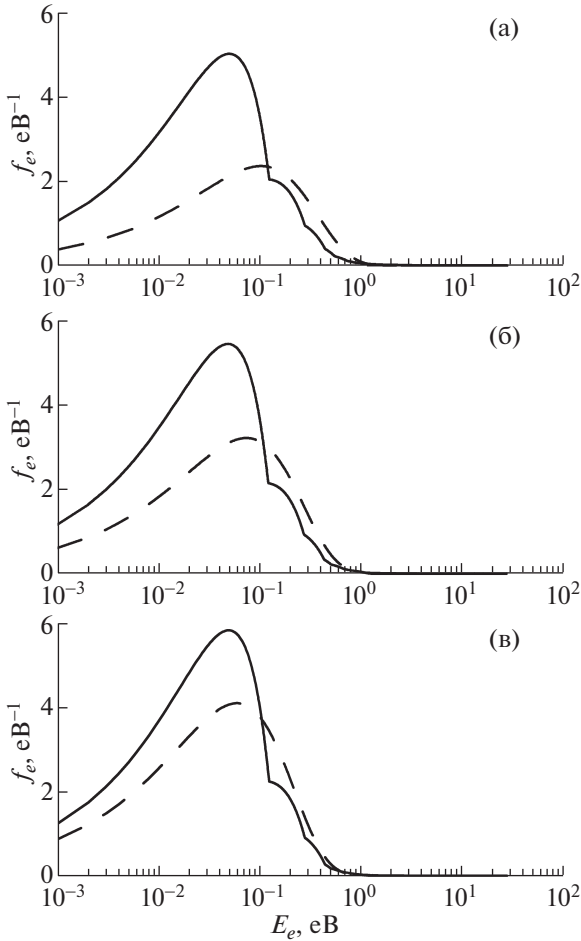


Рис. 4. Функции распределения фотоэлектронов f_e по энергиям E_i (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (в). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ, квантовый выход определяется выражением (10). Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми.

где $h_1 = 1$ см, $\lambda_D = \sqrt{T_e/4\pi N_0 e^2}$, величины p и N_e зависят от работы выхода вещества лунного грунта и представлены на рис. 6 для участков лунного реголита, характеризующегося работой выхода $W = 6$ эВ и квантовым выходом (10). Анализ соотношения (11) для этих данных показывает, что уже на высотах в несколько сантиметров и выше над поверхностью Луны фотоэлектроны от поверхностей парящих пылевых частиц (описываемые вторым слагаемым в правой части (11)) преобладают над фотоэлектронами от поверхности Луны (описываемыми первым слагаемым в правой части этого соотношения). Далее [6], на вы-

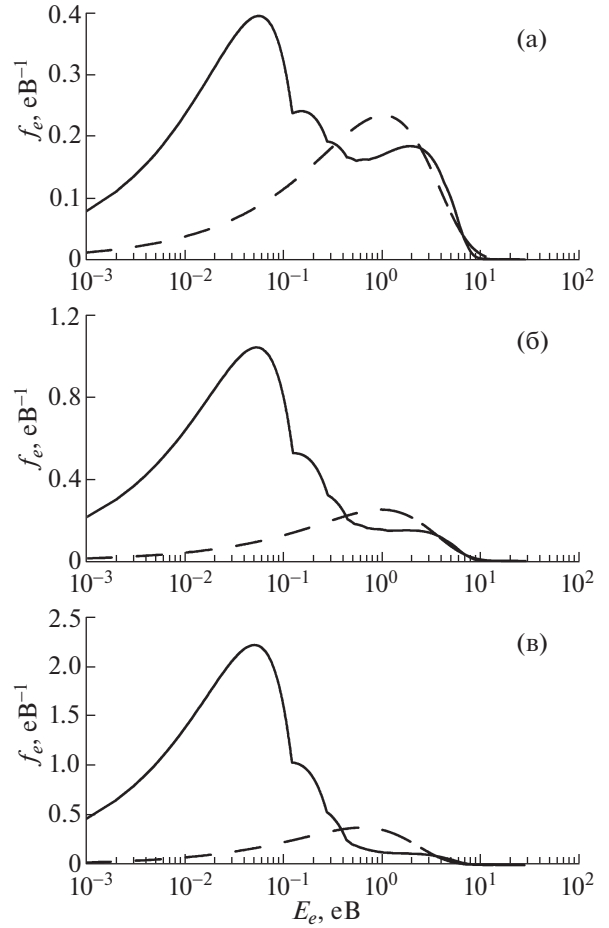


Рис. 5. Функции распределения фотоэлектронов f_e по энергиям E_i (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (в). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ, квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [37]. Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми.

сотах более $(5-6)\lambda_D$ на плотность фотоэлектронного слоя оказывает заметное влияние солнечный ветер. Образование фотоэлектронов в приповерхностном слое Луны – важный эффект, связанный с формированием плазменно-пылевой системы.

Данные, характеризующие распределения пылевых частиц для условий, соответствующих участкам лунного реголита, полученные для разных значений квантового выхода [36, 37] на основе метода, развитого в [5], приведены соответственно на рис. 7 и 8. На рис. 7а–в и 8а–в представлены гистограммы, описывающие результаты расчетов концентраций пылевых частиц

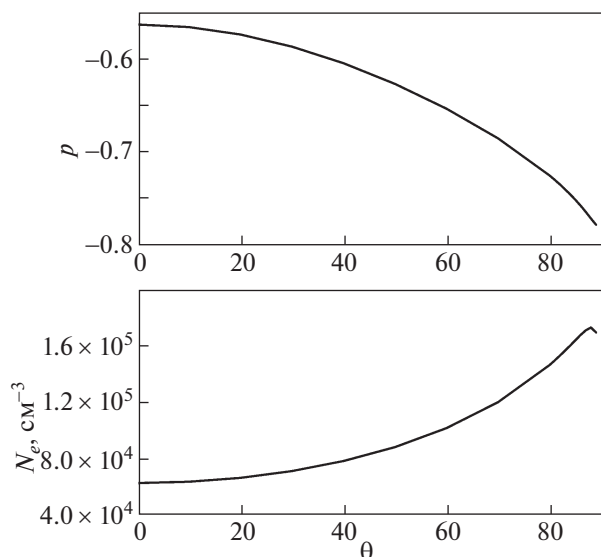


Рис. 6. Величины ρ и N_e в зависимости от угла θ для участков лунного реголита.

над поверхностью Луны для углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равных 77° , 82° и 87° . Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из этих графиков характеризует концентрацию частиц (в см^{-3}) на соответствующих высотах h с размерами в соответствующем интервале (указанном на шкале в верхней правой части графика). Общая длина горизонтального участка на графике соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом графике. Рис. 7г и 8г представляют результаты вычислений максимально возможных высот подъема пылевых частиц различных размеров для различных значений угла θ .

На рис. 7 и 8 представлены результаты расчетов распределения пылевых частиц для некоторых достаточно больших значений угла θ (превышающих 70°). Соответствующая широтная область представляет интерес, поскольку посадка космических аппаратов “Луна-25” и “Луна-27” будет осуществляться вблизи полярных областей Луны. Аналогичные расчеты, проведенные и для меньших углов θ , демонстрируют возможность подъема пылевых частиц над поверхностью Луны во всем диапазоне углов θ [4]. Это опровергает существование так называемой “мертвой зоны” [1] (в окрестностях лунной широты 80°), где (в соответствии с выводами работы [1]) частицы не поднимаются. Причиной этого является адекватное рассмотрение эффекта фотоэлектронов [4].

4. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В соответствии с российской космической программой в ближайшие десятилетия планируются комплексные исследования Луны. На первом этапе, в начале следующего десятилетия, намечена, в частности, реализация двух проектов, включающих посадку на Луну спускаемых аппаратов “Луна-25” и “Луна-27”. Основной целью этих экспедиций являются детальные исследования полярных областей Луны. Среди широкого круга научных задач, стоящих перед этими посадочными аппаратами, есть и задача изучения динамики пылевой компоненты приповерхностной экзосферы Луны. С этой целью в состав научной аппаратуры космического аппарата “Луна-25” включен прибор “Пылевой мониторинг Луны” (Пмл).

Прибор 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. 9): 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. По сигналу с ПКП можно оценить импульс пылевой частицы. Регистрируя время прохождения частицы через сетку и время соударения частицы с ПКП, можно оценить скорость, а следовательно, и массу пролетающей частицы.

Конструктивно блок IS – это блок, апертура которого представляет собой 24 ПКП общей площадью 170×150 мм. ЗЧС расположена на расстоянии 8 мм от поверхности ПКП. В блоке размещена электроника прибора. ПКП выполнены из материала ЦТС-19 [38]. Размер каждого пьезоэлектрического элемента составляет 30×23 мм. ES1 и ES2 предназначены для измерений параметров приповерхностной плазмы. Каждый из этих датчиков включает в себя зонд Ленгмюра (ЗЛ) и зарядочувствительный датчик (ЗЧД). Вольт-амперные характеристики, полученные зондом Ленгмюра, определяют плотность тока заряженных частиц при различных значениях потенциалов измерительных электродов. Эти данные позволяют оценить концентрацию плазмы, напряженность приповерхностного электрического поля и их суточные вариации у поверхности Луны. Блоки прибора Пмл установлены на борту посадочного аппарата таким образом, что после

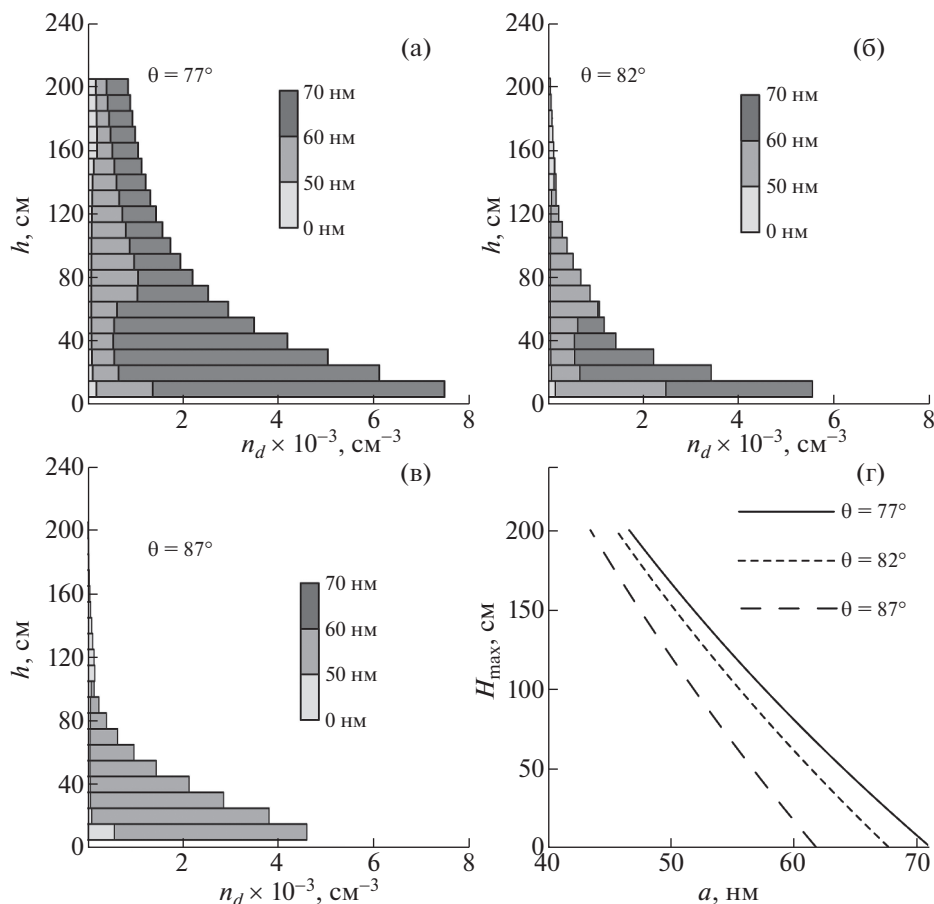


Рис. 7. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77$ (а), 82 (б), 87° (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для $N_0 = 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0.1 \text{ эВ}$.

посадки космического аппарата на поверхность Луны IS окажется на высоте ~ 45 см от поверхности Луны, а ES1 и ES2 на высотах ~ 35 и ~ 120 см соответственно.

К сожалению, на посадочном аппарате “Луна-25” не было возможности установить штангу для размещения электростатических датчиков, 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 [39]. Моделирование выполнялось “методом частиц в ячейках” (PIC) [40] с использованием программного обеспечения SPIS-DUST (Spacecraft Plasma Interaction Software) [41]. При моделировании были использованы ожидаемые параметры плазмы в приповерхностной зоне Луны, находящейся в условиях сол-

нечного ветра. При этом учитывалась также реальная конфигурация посадочного аппарата “Луна-25” и планируемое место посадки [39].

Результаты компьютерного моделирования электростатического потенциала вблизи поверхности Луны с учетом влияния на него посадочного аппарата приведены на рис. 10 и 11 для дневных условий, соответствующих расположению Солнца в 22° и 11° над горизонтом. Достаточная малость углов, характеризующих расположение Солнца, обусловлена тем, что место посадки спускаемого аппарата “Луна-25” ожидается вблизи Южной полярной области Луны.

На рис. 10, 11 видны значительные возмущения плазменного окружения вблизи посадочного аппарата. С подсолнечной стороны потенциал посадочного аппарата положительный и соответствует ~ 10 В. Эти возмущения заметны на расстоянии до ~ 1 м от корпуса посадочного аппарата. С теневой стороны потенциал посадочного аппарата отрицательный. Для случая, когда Солнце находится в 22° над горизонтом, разница в потенциалах между соответствующими датчиками ES

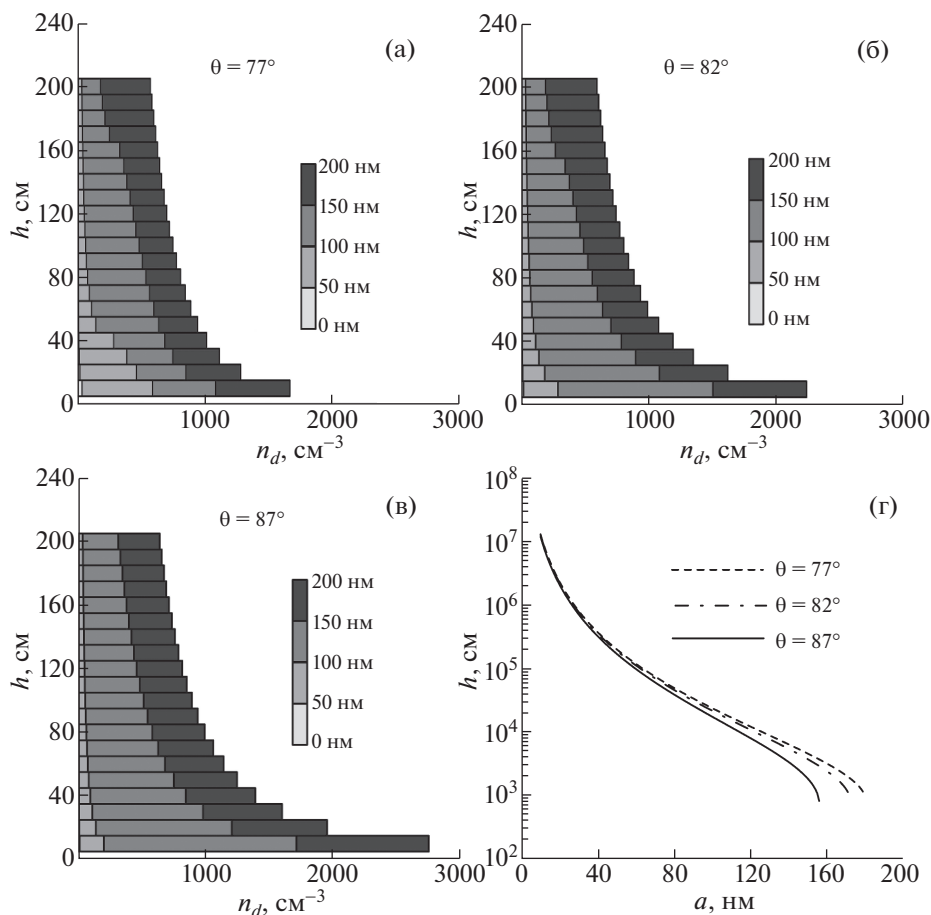


Рис. 8. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77$ (а), 82 (б), 87° (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для $N_0 = 1.3 \times 10^2 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 1.3 \text{ эВ}$.

вблизи посадочного аппарата, как в случае “Луны-25”, и на удалении (в 3 м от посадочного аппарата) достигает 7 В. В ситуации, когда Солнце находится в 11° над горизонтом, аналогичная разница в потенциалах еще больше (около 50 В). Таким образом, результаты измерений параметров окружающей плазмы зондом Ленгмюра, который расположен на расстоянии 15 см от поверхности посадочного аппарата “Луна-25”, необходимо корректировать, чтобы учесть возмущения среды.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И СПИСОК СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОБЛЕМ

Итак, лунная пыль, особенно ее мелкодисперсная составляющая — от десятков нанометров до сотен микрометров — является чрезвычайно динамичной составляющей лунного реголита. Поведение частиц лунной пыли в значительной степени определяется солнечным излучением, в особенности интенсивностью УФ-излучения. Заряженные частицы лунного реголита способны подниматься над поверхностью Луны в результа-

те электростатических процессов. Эти частицы становятся важной составляющей плазменно-пылевой экзосферы Луны. Теоретическое и численное моделирование проясняет некоторые особенности плазменно-пылевой системы над Лунной. Однако существуют проблемы, касающиеся ее параметров и проявлений, на которых следует сосредоточиться в будущем. Ниже перечисляются некоторые из проблем, которые могут быть важны для детального изучения пылевой плазмы над поверхностью Луны.

5.1. Квантовый выход и работа выхода лунного реголита

К сожалению, значения квантового выхода, приведенные ранее (см., например, [36, 37]), недостаточно обоснованы. Например, как отмечается в работе [37], где приводится описание квантового выхода, измеренного для частиц лунного реголита, доставленных в рамках миссий “Аполлон-14” и “Аполлон-15”, манипуляции с частицами лунного грунта проводились в инертной ат-

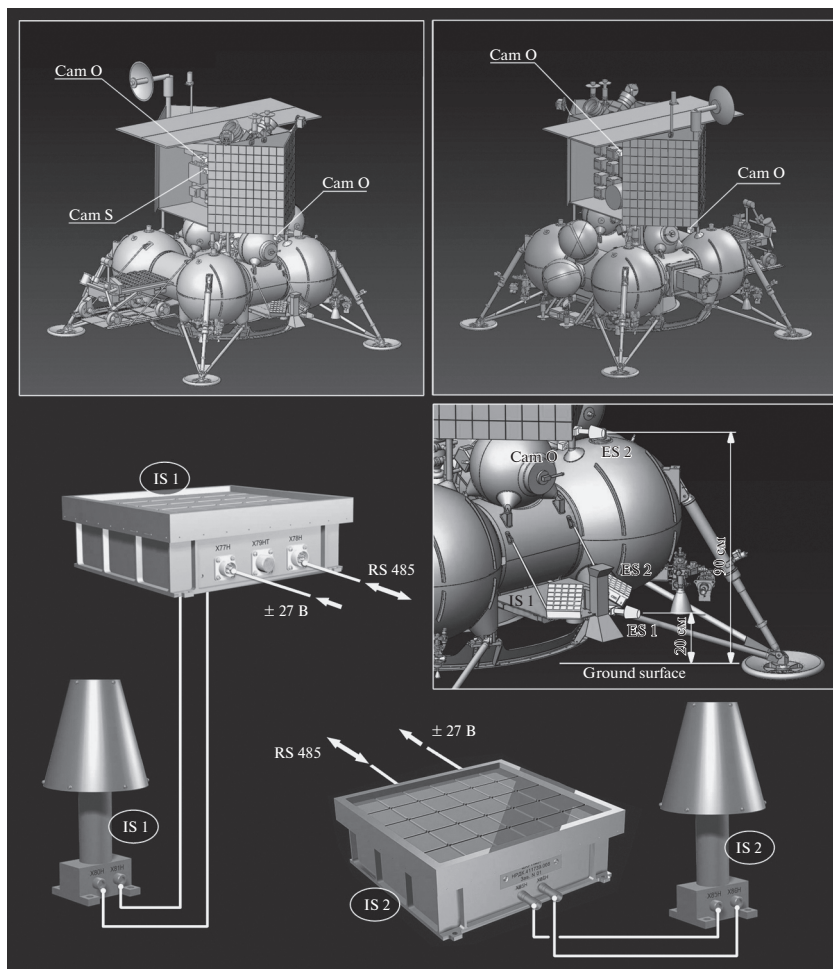


Рис. 9. Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станции “Луна-25”. Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O).

мосфере, содержащей примеси. Таким образом, поверхность образцов лунного реголита подвергалась воздействию посторонних веществ, а ее электрофизические свойства (включая квантовый выход и работу выхода) могли существенно измениться. Более того, авторы [37] изучали довольно мелкие частицы. Это также могло повлиять на полученные значения квантового выхода. Все эти обстоятельства указывают на необходимость определения квантового выхода (и работы выхода) для лунного реголита независимыми методами, предполагающими отсутствие взаимодействия образцов с воздухом и/или примесями. Доставить на Землю лунный грунт таким образом, чтобы избежать ее взаимодействия с земной атмосферой, трудно. В этой связи, исследования квантового выхода и работы выхода лунного реголита непосредственно на Луне представляют значительный интерес. Эта возможность обсуж-

дается в рамках подготовки будущей миссии “Луна-27” [7].

5.2. Влияние имплантированного водорода на фотоэмиссионные свойства лунного реголита

Данные Lunar Reconnaissance Orbiter [42] указывают на существование областей, обогащенных водородом, в поверхностном слое Луны на лунных широтах, превышающих 70° в южном полушарии. Существование областей водорода в приповерхностном лунном грунте, возможно, обусловлено взаимодействием электронов и протонов солнечного ветра и/или хвоста магнитосферы Земли, которые сталкиваются с поверхностью Луны и поглощаются в лунном грунте, где они могут участвовать в образовании нейтральных атомов водорода. Так образованный имплантированный водород может подниматься на поверхность Луны в форме атомарного или молекулярного водорода. Присутствие водорода в

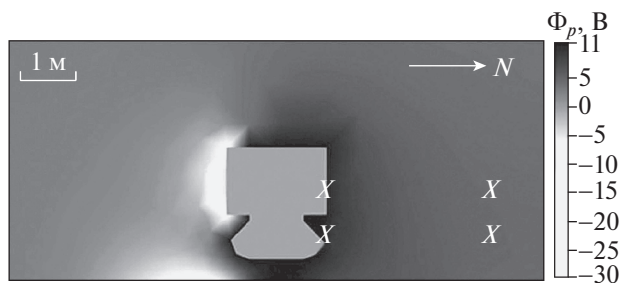


Рис. 10. Результаты численного моделирования распределения потенциала плазмы Φ_p в окрестностях посадочного аппарата на поверхности Луны в условиях, когда Солнце находится в 22° над горизонтом. Моделирование осуществлено с использованием программы SPIS-DUST. Шкала величины потенциала плазмы в вольтах представлена на рисунке справа. Направление на Солнце показано стрелкой. Знаком “X” отмечены положения датчиков ES1 (снизу) и ES2 (сверху), вблизи посадочного аппарата, как в случае “Луны-25”, и на удалении (3 м от посадочного аппарата), как в ситуации, если бы датчики крепились на длинной штанге.

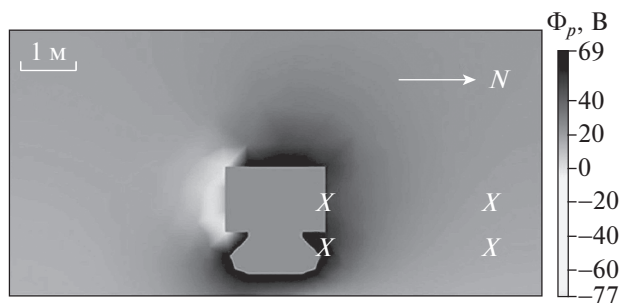


Рис. 11. То же, что и на рис. 10, но для условий, когда Солнце находится в 11° над горизонтом.

лунном реголите может по-разному влиять на фотоэлектрические свойства лунного реголита и параметры плазменно-пылевой системы над Луной [43]. Необходимо разработать модель, которая позволит рассчитать миграцию свободных протонов в реголите и описать физико-химическую активность протонов в лунном грунте в зависимости от параметров системы.

5.3. Волны в плазме над поверхностью Луны

Нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц, что приводит к развитию неустойчивости и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн [44]. Кроме того, возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждение которых может, например, происходить в окрестности лунного терминатора [45]. Далее, движение Луны, а вместе с ней и околослунной плазмы, относительно плазмы хвоста магнитосферы происходит со скоростью порядка 1 км/с. Более того, во время геомагнитных бурь и суббурь частицы с энергиями порядка 10 кэВ, захваченные в радиационных поясах, могут проникать в хвост магнитосферы [31, 46] и, тем самым, формировать потоки заряженных частиц в хвосте магнитосферы. Все это приводит к развитию плазменных неустойчивостей в областях взаимодействия лунной поверхности с плазмой хвоста магнитосферы и, таким образом, говорит о важности волновых процессов в этих областях [10, 46].

Волновые движения в приповерхностном слое освещенной части Луны (или те или иные их проявления) могут быть зафиксированы с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций “Луна-25” и “Луна-27”. Так, в состав выносных датчиков на станции “Луна-27”, входит зонд Ленгмюра, с помощью которого возможны локальные измерения флуктуаций концентрации и потенциала в плазме. С другой стороны возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра и интерпретации данных наблюдений.

5.4. Учет влияния посадочного аппарата на окружающую среду при экспериментальном исследовании пылевой плазмы у поверхности Луны

Одним из направлений исследований Луны в проектах “Луна-25” и “Луна-27”, которые разрабатываются в настоящее время для реализации в первой половине 2020-х гг., является исследование динамики пылевых частиц и плазменно-пылевой обстановки вблизи поверхности Луны. С этой целью готовится эксперимент ПмЛ. При создании прибора для регистрации пылевых частиц использован метод измерений, который ранее еще не использовался в лунных исследованиях. Измерения параметров плазмы в рамках эксперимента ПмЛ будут выполняться датчиками, расположенными в зоне возмущений окружающей среды, телом посадочного аппарата. Поэтому результаты измерений, полученные этим прибором, должны быть откорректированы с учетом влияния посадочного аппарата на окружающую среду. Усовершенствованный вариант прибора ПмЛ будет установлен на российском посадочном аппарате “Луна-27”. Этот посадочный аппарат будет оснащен штангой с расположенными на ней датчиками параметров плазмы.

Работа представлена на международной научной конференции “Advances and Applications in Plasma Physics” (Saint Petersburg, Russia, 2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 59.
2. *Sternovsky Z., Chamberlin P., Horányi M., Robertson S., Wang X.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A10104.
3. *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.
4. *Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Попель С.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 198.
5. *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.
6. *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 в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 755.
7. *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 в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. С. 131.
8. *Буринская Т.М.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 17.
9. *Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 123701.
10. *Izvekova Yu.N., Morozova T.I., Popel S.I.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46. P. 731.
11. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M., Dubinskii A.Yu.* // Planet. Space Sci. 2018. V. 156. P. 71.
12. *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.
13. *Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z.* // Nature. 2015. V. 522. P. 324.
14. *Norton R.H., Guinn J.E., Livingston W.C., Newkirk G.A., Zirin H.* // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 815.
15. *Rennilson J.J., Criswell D.R.* // The Moon. 1974. V. 10. P. 121.
16. *Zook H., McCoy J.* // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 2117.
17. *Severny A.B., Terez E.I., Zvereva A.M.* // The Moon. 1975. V. 14. P. 123.
18. *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.
19. *Vyshlov A.S.* // Space Research / Ed. M.J. Mycroft. Paris: COSPAR, 1975. V. 16. P. 945.
20. *Elsmore B.* // Phil. Mag. Ser. 8. 1957. V. 2. P. 1040.
21. *Вышков А.С., Савич Н.А.* // Космические исследования. 1978. Т. 16. С. 551.
22. *Berg O.E., Richardson F.F., Burton, H.* // Apollo 17 preliminary science report. NASA Spec. Publ. 16-1–16-9. SP-330. 1973.
23. *Berg O.E., Wolf H., Rhee J.* // Interplanetary Dust and Zodiacal Light / Eds H. Elsasser and H. Fechtig. New York: Springer, 1976. P. 233.
24. *Berg O.E., Richardson F.F.* // Rev. Sci. Instrum. 1969. V. 40. P. 1333.
25. *Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманиук Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 641.
26. *Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 594.
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., Атаманиук Б.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 379.
28. *Родэ О.Д., Иванов А.В., Назаров М.А., Цимбалникова А., Юрек К., Гейл В.* // Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. Прага: Академия, 1979.
29. *Колмогоров А.Н.* // ДАН. 1941. Т. 31. С. 99.
30. *Кузнецов В.М.* Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.
31. *Colwell J.E., Batiste S., Horányi M., Robertson S., Sture S.* // Rev. Geophys. 2007. V. 45. P. RG2006.
32. *Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И.* // ДАН. 2007. Т. 415. С. 247.
33. *Park J., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A.* // J. Aerospace Engineering. 2008. V. 21. P. 266.
34. *Losseva T.V., Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu.N., Shukla P.K.* // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 013703.
35. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M.* // Europ. Phys. J. D. 2014. V. 68. P. 245.
36. *Walbridge E.* // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3668.
37. *Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B.* // Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space / Eds. R.J.L. Grard, D. Reidel. Dordrecht, 1973. P. 389.
38. *Мальхин А.Ю., Скрялёв А.В., Панич А.Е., Свирская С.Н., Кретьова Е.И., Медведева Е.С.* // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 4. С. 213.
39. *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., Kopyn S.I.* // Planetary Space Sci. 2018. V. 156. P. 62.
40. *Харлоу Ф.Х.* Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
41. *Hess S.L.G., Sarrailh P., Matéo-Vélez J.-C., Jeanty-Ruard B., Cipriani F., Forest J., Hilgers A., Honary F., Thiébault B., Marple S.R., Rodgers D.* // IEEE Transactions Plasma Sci. 2015. V. 43. P. 2799.

42. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozurev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D.E., Starr R., Tretyakov V.I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M.T.* // *Science*. 2010. V. 330. P. 483.
43. *Дубинский А.Ю., Попель С.И.* // *Космические исследования*. 2019. Т. 57. С. 93.
44. *Popel S.I., Morfill G.E., Shukla P.K., Thomas H.* // *J. Plasma Phys.* 2013. V. 79. P. 1071.
45. *Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2015. Т. 41. С. 867.
46. *Asano Y., Shinohara I., Retinò A., Daly P.W., Kronberg E.A., Takada T., Nakamura R., Khotyaintsev Y.V., Vaivads A., Nagai T., Baumjohann W., Fazakerley A.N., Owen C.J., Miyashita Y., Lucek E.A., Rème H.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. A05215.
47. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. С. 474.