

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В ОКРЕСТНОСТЯХ ЛУНЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ¹

© 2023 г. С. И. Попель^{a,*}, А. В. Захаров^a, Л. М. Зеленый^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 20.09.2022 г.

Приведен краткий обзор исследований по пылевой плазме над поверхностью Луны, выполненных за последнее время в Институте космических исследований РАН. Исследования связаны с будущими миссиями “Луна-25” и “Луна-27”, в рамках которых будут исследоваться свойства пыли и пылевой плазмы над лунной поверхностью. Рассмотрены проблемы формирования пылевой плазмы над освещенной частью Луны, в области лунного терминатора, влияния магнитных полей на окололунную пылевую плазму, влияния на результаты измерений посадочного модуля космического аппарата. Сформулированы нерешенные проблемы, касающиеся изучения окололунной пылевой плазмы.

Ключевые слова: пылевая плазма, Луна, терминатор, магнитные поля, реголит, фотоэмиссионные свойства, волны

DOI: 10.31857/S0367292122600935, **EDN:** KNEHTO

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1959 г. американский фантаст и популяризатор науки Айзек Азимов опубликовал научно-популярную статью “14 Million Tons of Dust Per Year” в журнале “Science Digest”. Хотя величина 14 миллионов тонн и касалась количества пыли, падающей на всю поверхность Земли за год, эти данные позволили оценить ожидаемую толщину слоя пыли на лунной поверхности в несколько десятков метров. Основываясь на этих предположениях, британский фантаст Артур Кларк в 1961 г. опубликовал научно-фантастический роман “Лунная пыль”. Согласно сюжету романа на Луне, покрытой очень толстым слоем пыли, присутствуют лунные поселения и между ними курсируют специальные корабли-пылеходы.

Проекты долговременного лунного поселения разрабатывались в СССР примерно с 1960 г., в конструкторском бюро общего машиностроения под руководством В.П. Бармина. Идею создания таких поселений выдвинул С.П. Королев, а за образец приняли модули, используемые при устройстве станций в Антарктиде. Часть специалистов предполагала, что Луна, покрытая толстым слоем пыли, поглотит любой прилунившийся аппарат, а тем более постройку. Существо-

ет легенда, что бесконечным спорам по этому поводу положил конец сам С.П. Королев. На одном из совещаний он написал в блокноте: “Луна – твердая. С. Королев”, поставил дату, расписался и вручил листок с “резолюцией” своему оппоненту. Легенда – легендой, но сохранилась его записка с примерно таким, по смыслу, текстом.

С.П. Королев оказался прав. Уже в 1966 г. сконструированная с учетом предположения о достаточно твердом грунте Луны (типа пемзы) посадку на ее поверхность совершила советская автоматическая станция “Луна-9”. Американские астронавты, побывавшие на Луне в 1969–1972 гг., выяснили, что слой пыли на лунной поверхности не превышает нескольких сантиметров или десятков сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам астронавтов, поверхностям космических аппаратов, приборам и устройствам, что может угрожать работе систем. Например, на поверхности приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения, что может привести к их перегреву. 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.

¹ Доклад “Dusty Plasmas in the Vicinity of the Moon: Current Research and New Vistas” сделан на 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, May 23–27, 2022).

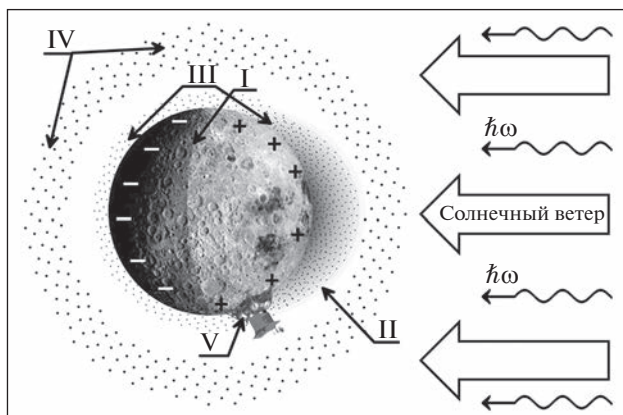


Рис. 1. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ($h\omega$), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в Южной полусфере.

Важна роль в будущих лунных исследованиях пыли в приповерхностном слое над Луной. На посадочных модулях станций “Луна-25” и “Луна-27” предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения [1]. Пыль в приповерхностном слое над Луной имеет свои особенности. Прежде всего, там доминируют электростатические и плазменно-пылевые процессы [2]. Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением и поверхность Луны, и частицы пыли испускают электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. Но одновременно и пылевые частицы, и поверхность 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 (рис. 1). На перенос пыли над Луной влияет также магнитное поле Земли [3, 4].

Интерес к описанию плазменно-пылевой системы в окрестности Луны резко возрос в конце 1990-х гг., когда были разработаны методы исследования пылевой плазмы [5–12]. Удалось, в частности, изучить плазменно-пылевую систему в приповерхностном слое освещенной части Луны, в том числе, и в области высоких лунных широт,

где предполагается осуществить прилунение посадочных модулей станций “Луна-25” и “Луна-27” [13, 14]. Исследование освещенной части Луны важно для этих проектов, поскольку работа станций, питающихся от солнечных батарей, будет происходить в основном во время лунного дня.

Существенной мотивацией исследований пыли над поверхностью Луны служат планы создания обитаемой лунной базы, обсуждения которой ведутся достаточно активно. Пыль опасна для участников лунной экспедиции, особенно при попадании в легкие. Если в лунных экспедициях 1960–1970-х гг. контакт астронавтов с лунной пылью был короток, то при использовании обитаемых лунных баз проблему лунной пыли придется решать, чтобы избежать серьезных проблем со здоровьем у участников лунной экспедиции. Кроме того, пыль может представлять опасность и для работы аппаратуры лунной базы. Лунная пыль представляет собой существенный фактор риска и важный объект для исследований.

В настоящей работе приводится краткий обзор исследований, касающихся лунной пыли и пылевой плазмы, выполненных сотрудниками Института космических исследований РАН, в том числе, и для понимания данных, которые, как ожидается, будут получены в исследованиях в рамках будущих миссий “Луна-25” и “Луна-27”.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛИ НАД ОСВЕЩЕННОЙ ЧАСТЬЮ ЛУНЫ

Обычно в качестве пылевой компоненты плазмы над поверхностью Луны рассматривают частицы лунного реголита, поднятые либо в результате электростатических процессов (см., например, [14]), либо вследствие ударов метеороидов [15–18]. Лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от нанометров до нескольких метров в поперечнике, стеклов, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т.д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами оплавления и спекания. Распределение частиц реголита на поверхности Луны удовлетворяет логарифмически-нормальному закону (распределению Колмогорова), что оказывается типичным для случая многократного дробления [19]. Справедливость логнормального распределения (распределения Колмогорова) по размерам частиц лунного реголита подтверждается экспериментальными данными. Например, в работе [12] продемонстрировано хорошее согласие экспериментальных данных [20] с распределением Колмогорова для частиц пыли на поверхности Луны с размерами в диапазоне от 20 до 500 мкм. В [21] 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 [20] 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 [22].

Вычисление распределений пыли и электронов в приповерхностном слое освещенной части Луны производится на основе теоретической модели [14], 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). 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 [20] в диапазоне размеров частиц пыли на поверхности Луны от 20 до 500 мкм.

Важным параметром, необходимым для расчетов, является концентрация фотоэлектронов непосредственно у поверхности Луны, которые возникают, главным образом, от ее поверхности (но

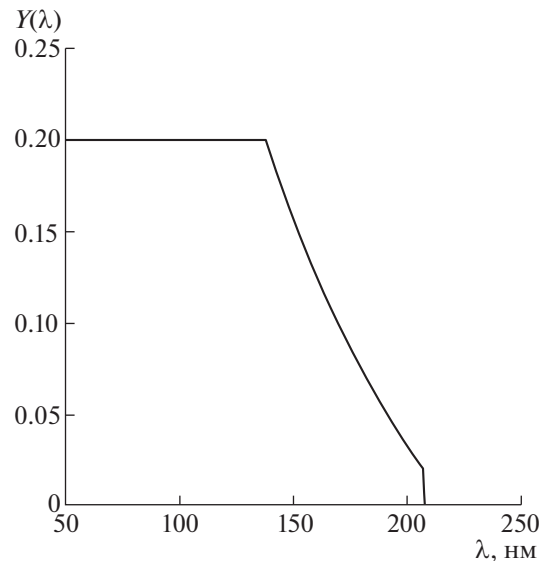


Рис. 2. Зависимость квантового выхода Y [25] вещества лунной поверхности от длины волны λ .

не от поверхностей парящих пылевых частиц) при взаимодействии с солнечным излучением [23, 24]. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям определяется стандартным образом [25] 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. 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 [25] и [26]. Наиболее вероятный квантовый выход вещества лунной поверхности, приведенный в [25], представлен на рис. 2.

Квантовый выход, полученный в [26], является результатом экспериментального исследования, выполненного на образцах лунной пыли, доставленных на Землю в миссиях “Аполлон-14” и –15. На рис. 3 приведена зависимость квантового выхода [26]. Видно, что она существенным обра-

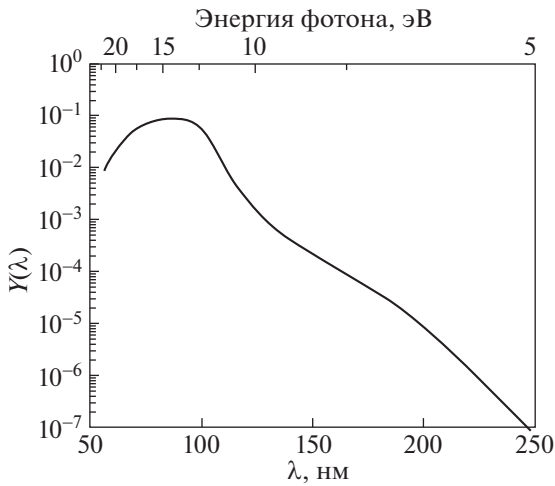


Рис. 3. Зависимость квантового выхода Y [26] вещества лунной поверхности от длины волны λ .

зом отличается от теоретической (полуэмпирической) зависимости [25].

В табл. 1 приведены параметры фотоэлектронов (N_0 , T_e), рассчитанные [23] 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 из работы [25], а индексом $Y2$ — квантовому выходу [26]). Из табл. 1 видно, что существенная разница в значениях квантового выхода [25] и [26] 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 [25] и [26] также существенно более сильно сказываются на расчетах,

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

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

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 [25] и [26] 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 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.

К сожалению, значения квантового выхода в работах [25] и [26] 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 [23].

Данные, характеризующие распределения пылевых частиц для условий, соответствующих участкам лунного реголита, полученные для разных значений квантового выхода [25] и [26] на основе метода, развитого в [14], приведены соответственно на рис. 4 и 5. На рис. 4а–в и 5а–в представлены гистограммы, описывающие результаты расчетов концентраций n_d пылевых частиц 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. 4г и 5г представляют результаты вычислений максимально

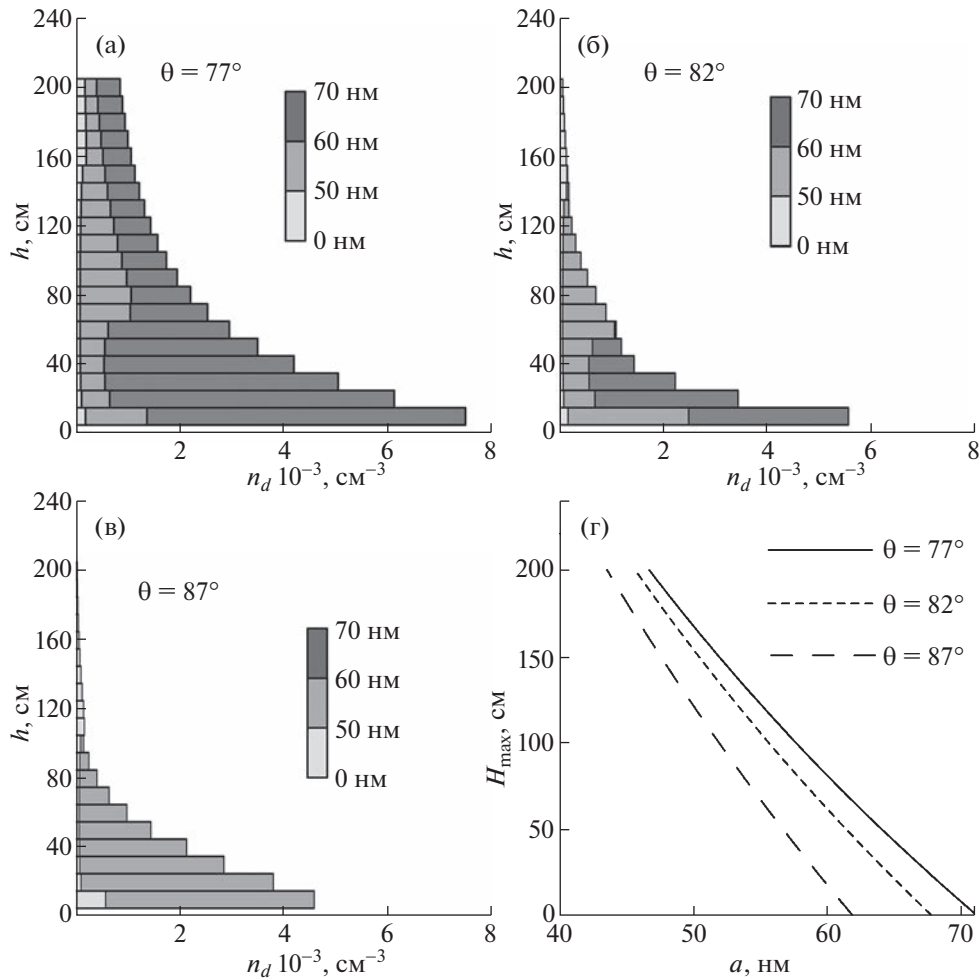


Рис. 4. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77^\circ$ (а), 82° (б), 87° (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для $N_0 = 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0.1 \text{ эВ}$.

возможных высот подъема пылевых частиц различных размеров для различных значений угла θ .

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчетов распределения пылевых частиц для некоторых достаточно больших значений угла θ (превышающих 76°). Соответствующая широтная область представляет интерес, поскольку посадка космических аппаратов “Луна-25” и “Луна-27” будет осуществляться вблизи полярных областей Луны. Это опровергает существование так называемой “мертвой зоны” [27] (в окрестностях лунной широты 80°), где (в соответствии с выводами работы [27]) частицы не поднимаются. Причиной этого является адекватное рассмотрение эффекта фотоэлектронов [13].

3. ЛУННЫЙ ТЕРМИНАТОР

Из рис. 4 и 5 видно, что характерный размер a и характерная концентрация n_d заряженных пы-

левых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются, соответственно, значениями порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} . 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 $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, имеется существенный скачок концентрации пыли в области терминатора – линии светораздела, отделяющей освещенную часть Луны от неосвещенной части.

Скорость терминатора относительно поверхности Луны составляет в области экватора примерно 4 м/с . Для широт, не слишком близких к

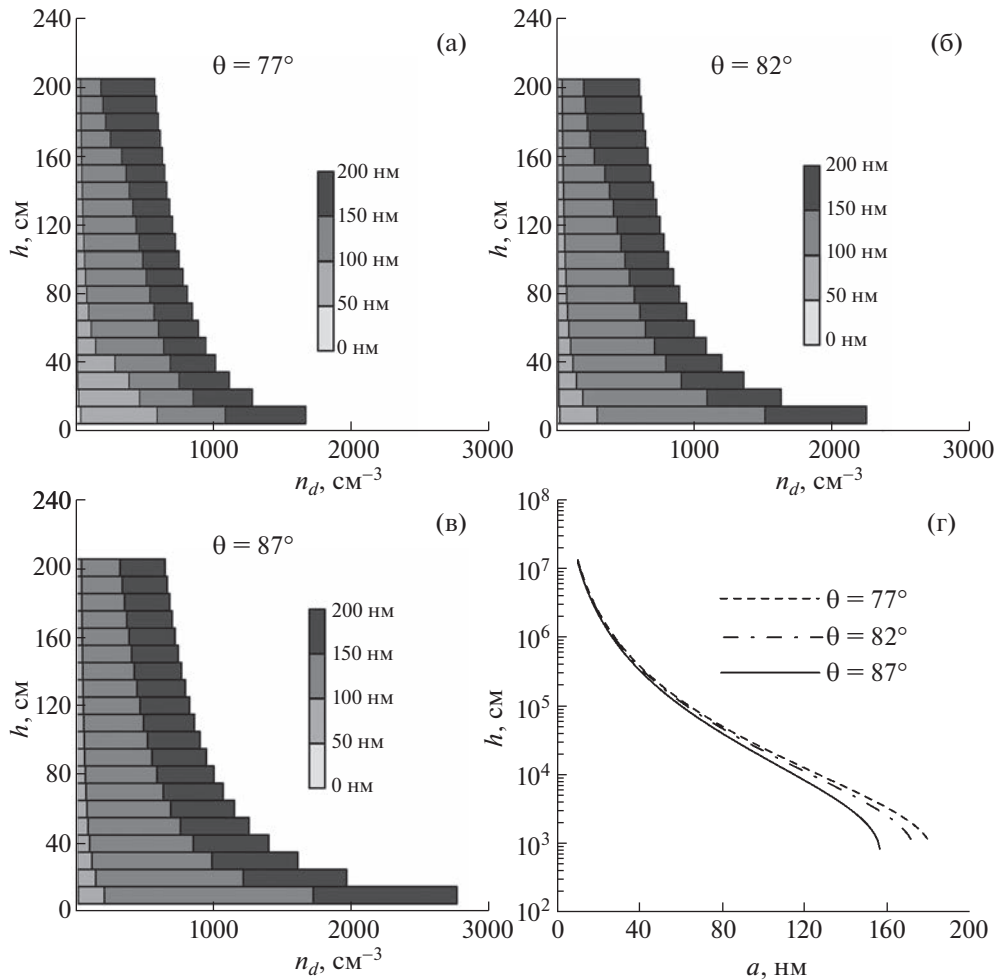


Рис. 5. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77^\circ$ (а), 82° (б), 87° (в), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г) для $N_0 = 1.3 \times 10^2 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 1.3 \text{ эВ}$.

90° , значение скорости терминатора имеет тот же порядок величины. Характерные температуры ионов и электронов солнечного ветра равны, соответственно, 6 и 12 эВ, фотоэлектронов над поверхностью Луны – 0.1–2 эВ. Таким образом, скорость лунного терминатора фактически всегда значительно превосходит тепловую скорость пыли v_{Td} (имеющую порядок 1–10 см/с) и является много меньшей тепловых скоростей ионов и электронов. Поскольку скорость движения терминатора по отношению к поверхности Луны постоянна, можно ожидать установление стационарных профилей плазмы в окрестности терминатора в системе отсчета, связанной с ним.

Некоторые свойства пылевой плазмы в области лунного терминатора удастся объяснить [28], рассматривая стационарную плазменную структуру, движущуюся с постоянной скоростью u относительно поверхности Луны. Оказывается, что в области терминатора возникает пылевая звуко-

вая нелинейная структура, сходная с плазменным слоем [29]. Действительно, основными составляющими плазмы над освещенной частью Луны являются фотоэлектроны и положительно заряженные пылевые частицы (см., например, [14]), тогда как над темной частью основной вклад вносят электроны солнечного ветра (имеющие большую компоненту скорости, перпендикулярную направлению распространения солнечного ветра, из-за больших значений температуры электронов в нем), электроны и ионы хвоста магнитосферы Земли, а также отрицательно заряженные пылевые частицы. В приповерхностном слое концентрации электронов и пылевых частиц над освещенной частью всегда значительно выше, чем соответствующие концентрации над темной частью Луны. Возникает резкая граница между этими частями (терминатор), и такая ситуация жестко поддерживается внешними факторами, в частности, непрерывным действием солнечного излучения на освещенную часть Луны, а также ее враще-

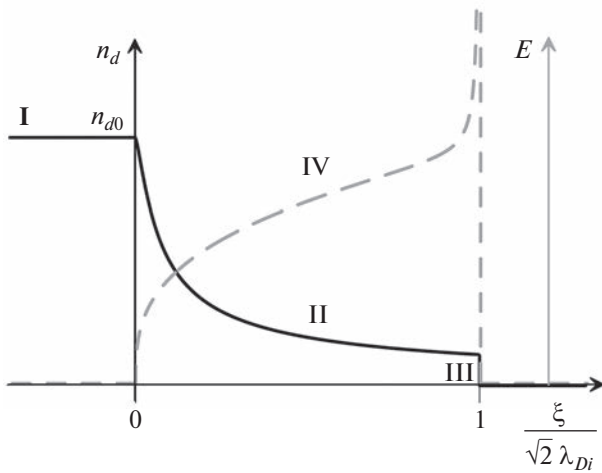


Рис. 6. Концентрация пылевых частиц (сплошная кривая) и электрическое поле (штриховая кривая) в окрестности лунного терминатора. Невозмущенные зоны соответствуют освещенной ($\xi < 0$) и темной ($\xi > \sqrt{2}\lambda_{Di}$) сторонам Луны. Зона $0 < \xi < \sqrt{2}\lambda_{Di}$ представляет собой плазменную возмущенную область, связанную с терминатором. Римские цифры I, II, III характеризуют участки сплошной кривой с различными зависимостями концентрации пыли. Участок IV на пунктирной кривой обозначает ту же область, что и участок II на сплошной кривой.

нием. Можно ожидать, что электроны и пылевые частицы стремятся покинуть освещенную часть, попасть в область терминатора (и дальше в почти пустое пространство над темной частью Луны). Поскольку тепловая скорость у электронов намного выше, чем у пылевых частиц, потеря электронов происходит гораздо быстрее, и в плазме (над освещенной частью Луны в окрестности терминатора) накапливается свободный положительный заряд. Вследствие этого потенциал плазмы (над освещенной частью Луны) относительно терминатора должен стать положительным, т.е. потенциал терминатора будет меньше нуля. Перепад потенциалов между терминатором и плазмой (над освещенной частью Луны) не может распределиться по всему объему плазмы, поскольку из-за дебаевского экранирования изменение потенциала должно происходить у терминатора в области толщиной в несколько дебаевских радиусов. Эта область, которая должна существовать в окрестности терминатора, представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме за счет электростатических сил удерживаются более подвижные частицы (в нашем случае электроны).

На рис. 6 схематически приведены параметры, характеризующие плазму в области лунного терминатора. Сплошные и штриховые линии представляют, соответственно, концентрацию пыле-

вых частиц и электрическое поле. Невозмущенные зоны соответствуют освещенной ($\xi < 0$) и темной ($\xi > \sqrt{2}\lambda_{Di}$) частям Луны. Здесь λ_{Di} — дебаевский ионный радиус. Зона $0 < \xi < \sqrt{2}\lambda_{Di}$ соответствует отрицательному потенциалу $\phi < 0$ и может трактоваться как плазменная возмущенная область, связанная с терминатором. Участок II занимает почти всю плазменную возмущенную область, связанную с терминатором.

Характерное значение напряженности электрического поля в области лунного терминатора может достигать значения $E \sim 300$ В/м [28]. Расчеты [28] проведены в предположении плоской (горизонтальной) лунной поверхности. Соответственно, направления описанных выше электрических полей — горизонтальные, а их воздействие на заряженные пылевые частицы приводит к увеличению компоненты скорости пылевых частиц, параллельной лунной поверхности. В действительности, лунная поверхность — неровная. Это означает, что электрические поля, возникающие в области лунного терминатора содержат как горизонтальные, так и вертикальные компоненты. Следует ожидать, что вертикальная компонента электрического поля сопоставима по длине с горизонтальной компонентой. Таким образом, значительная часть энергии пылевой частицы содержится в энергии ее вертикального движения. Оценка показывает, что при этом частицы с размерами 2–3 мкм могут подняться на высоту около 30 см над поверхностью Луны в области терминатора, что достаточно [30] для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor.

Отметим, что на возникновение значительных электрических полей в области терминатора могут влиять и другие эффекты, например, роль неоднородностей поверхности в формировании локальных электрических полей, что подробно исследовалось в работе [31]. Однако процессы, происходящие в области терминатора, зависящие от вариабельности внешних воздействий на реолит, особенностей реального рельефа поверхности при постоянно изменяющемся угле Солнца, чрезвычайно сложно поддаются анализу, моделированию и требуют дальнейшего изучения.

4. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

При рассмотрении пылевой плазмы над лунной поверхностью, как правило, не учитывают магнитные поля, которые считаются малыми и поэтому не влияющими на динамические процессы в пылевой плазме. Действительно, около четверти своей орбиты Луна находится в хвосте магнитосферы Земли [32], где типичные магнитные поля характеризуются значениями магнитной индукции порядка 10^{-5} – 10^{-4} Гс [33, 34]. Кро-

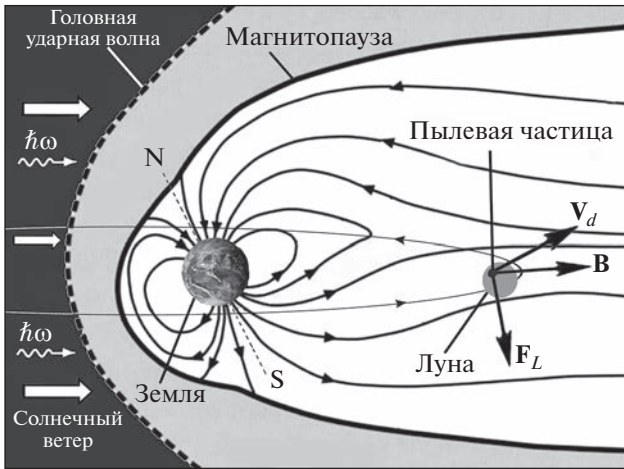


Рис. 7. Схематическое изображение движения Луны в хвосте магнитосферы Земли. Лунная орбита изображена тонкой линией; стрелки на лунной орбите показывают направление движения Луны. Также изображены солнечный ветер и фотоны солнечного излучения ($\hbar\omega$).

ме того, на Луне имеются так называемые области магнитных аномалий, связанные с магнитным веществом в лунной коре. Измерения приповерхностных магнитных полей на видимой стороне Луны, выполненные в рамках миссий “Аполлон-12”, -14, -15 и -16, составили соответственно 3.8×10^{-4} , 1.03×10^{-3} , 3×10^{-5} и 3.27×10^{-3} Гс [35]. Более того, из спутниковых измерений известно [36], что наибольшие (для Луны) магнитные поля присутствуют на невидимой стороне Луны. Считается, что эти поля определяют лимбовые возмущения солнечного ветра. Теоретические исследования магнитных полей у Луны посвящены, в основном, выявлению причин возникновения магнитных полей у Луны (см., например, [37–39]).

Луна движется по орбите со скоростью около 1 км/с [40]. Таким образом, с учетом того, что пылевая плазма у Луны “привязана” к ее поверхности, возникает относительная скорость движения заряженных пылевых частиц по отношению к магнитным силовым линиям поля магнитосферы Земли, имеющая порядок 1 км/с. Следовательно, несмотря даже на небольшие значения индукции магнитного поля у Луны возможно появление довольно ощутимой (из-за больших значений относительной скорости) магнитной части силы Лоренца, действующей на пылевую частицу. Схематически движение Луны в хвосте земной магнитосферы, вектор индукции магнитного поля B , скорость пылевой частицы v_d , а также магнитная часть силы Лоренца F_L показаны на рис. 7.

Влияние магнитного поля хвоста земной магнитосферы, а также магнитного поля в областях магнитных аномалий на процессы формирова-

ния пылевой плазмы над Луной исследовалось в работах [3, 4]. Было показано (см. рис. 8), что благодаря действию магнитных полей в хвосте магнитосферы Земли возможен перенос частиц заряженной пыли над лунной поверхностью на большие расстояния и, соответственно, пылевая плазма над освещенной Солнцем поверхностью Луны может существовать для всего диапазона лунных широт (от -90 до 90°). Перенос пылевых частиц сопровождается изменениями их зарядов. Изменение заряда пылевых частиц связано, в частности, с тем, что количество фотоэлектронов, окружающих пылевую частицу и влияющих на ее заряд, зависит от угла θ . Кроме того, на заряд частицы влияет высота, на которой пылевая частица находится. В процессе переноса высота меняется.

Что касается влияния магнитных полей в областях магнитных аномалий, в этом случае магнитная часть силы Лоренца, действующей на пылевую частицу, либо меньше, либо сопоставима с аналогичной силой, вычисленной для магнитных полей хвоста магнитосферы Земли на орбите Луны. При этом магнитные поля в областях магнитных аномалий могут приводить к изменениям траекторий пылевых частиц, отклоняя их от приведенных на рис. 8. Поскольку характерные размеры областей магнитных аномалий составляют всего несколько десятков километров (см., например, [37]), общая тенденция движения пылевых частиц, показанная на рис. 8, сохраняется.

5. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В соответствии с российской космической программой в ближайшие десятилетия планируются комплексные исследования Луны. На первом этапе 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, стоит 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) [41]. Прибор предназначен для исследования динамики пылевых частиц вблизи поверхности Луны и исследованию 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

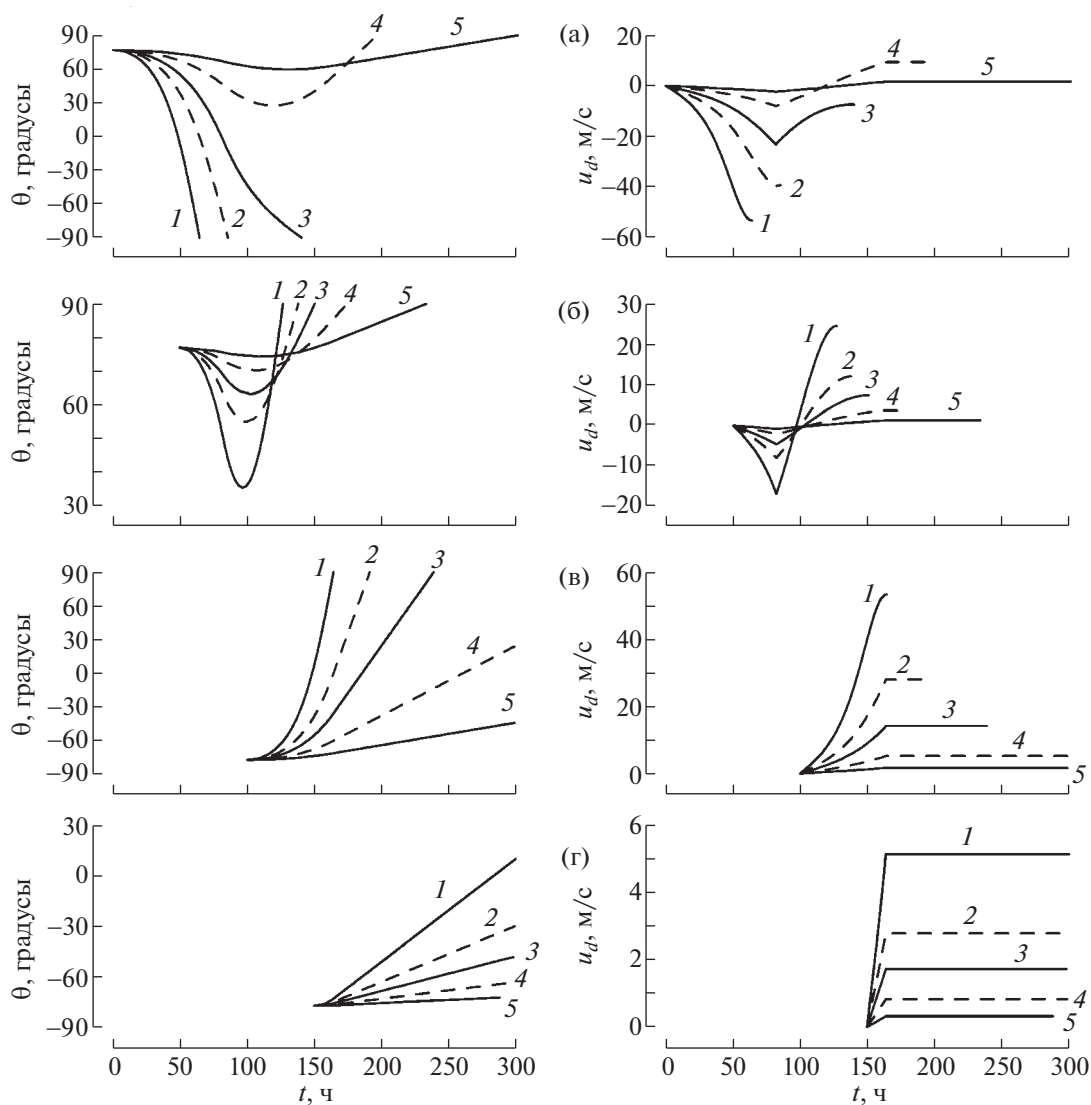


Рис. 8. Зависимости от времени t угловой координаты θ и компоненты скорости u_d пылевой частицы вдоль лунной поверхности. Момент времени $t = 0$ соответствует входу Луны в хвост магнитосферы Земли. Кривые (1), (2), (3), (4), и (5) характеризуют пылевые частицы, радиусы которых соответственно равны 0.03, 0.04, 0.05, 0.07 и 0.1 мкм. Приведены результаты для различных моментов отрыва пылевых частиц от лунной поверхности: 0 (а), 50 (б), 100 (в), и 150 (г) часов.

будет оценить величину приповерхностного электрического поля. Прибор ПМЛ включает три блока: блок ударных сенсоров и два блока электростатических датчиков, представляющих собой аналоги зонда Ленгмюра. В ударных сенсорах для регистрации пылевых частиц над поверхностью Луны использованы пьезокерамические пластины и зарядочувствительная сетка, расположенная перед пластинами. По сигналу с пьезокерамической пластины можно оценить импульс пылевой частицы. Регистрируя время прохождения частицы через сетку и время соударения частицы с пьезокерамической пластиной, можно оценить скорость, а следовательно, и массу пролетающей ча-

стицы. Блоки прибора ПМЛ установлены на борту посадочного аппарата “Луна-25” таким образом, что после посадки космического аппарата на поверхность Луны блок ударных сенсоров окажется на высоте ~ 45 см от поверхности Луны, а электростатические датчики – 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

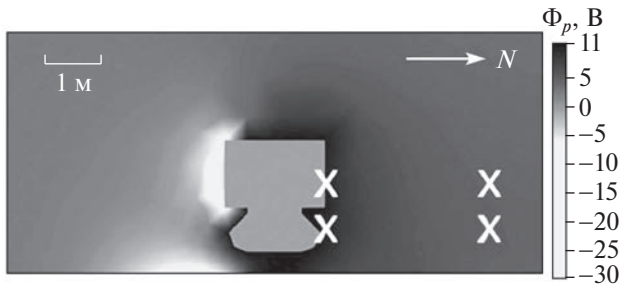


Рис. 9. Результаты численного моделирования распределения потенциала плазмы Φ_p в окрестностях посадочного аппарата на поверхности Луны в условиях, когда Солнце находится в 22° над горизонтом. Моделирование осуществлено с использованием программы SPIS-DUST. Шкала величины потенциала плазмы в вольтах представлена на рисунке справа. Направление на Солнце показано стрелкой. Знаком “X” отмечены положения электростатических датчиков, 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.

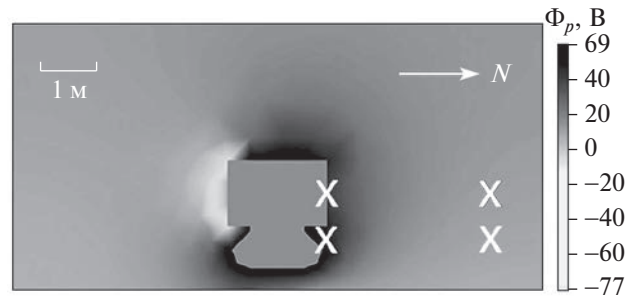


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но для условий, когда Солнце находится в 11° над горизонтом.

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 [41]. Моделирование выполнялось “методом частиц в ячейках” (PIC) [42] с использованием программного обеспечения SPIS-DUST (Spacecraft Plasma Interaction Software) [43]. 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-25” и планируемое место посадки [41].

Результаты компьютерного моделирования электростатического потенциала вблизи поверхности Луны с учетом влияния на него посадочного аппарата приведены на рис. 9 и 10 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. 9, 10 видны значительные возмущения плазменного окружения вблизи посадочного аппарата. С подсолнечной стороны потенциал посадочного аппарата положительный и соответствует ~ 10 В. Эти возмущения заметны на расстояниях до ~ 1 м от корпуса посадочного аппарата. С теневой стороны потенциал посадочного аппарата отрицательный. Для случая, когда Солнце на-

ходится в 22° над горизонтом, разница в потенциалах между соответствующими электростатическими датчиками 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.

6. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Существуют нерешенные проблемы, касающиеся параметров и проявлений пыли и пылевой плазмы в окрестности Луны, на которых следует сосредоточиться в будущем. Ниже перечисляются некоторые из этих проблем.

6.1. Квантовый выход и работа выхода лунного реголита

К сожалению, значения квантового выхода, приведенные ранее (см., например, [25, 26]), недостаточно обоснованы. Например, как отмечается в работе [26], 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 атмосфере, 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 [26] 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 ме-

тодами, 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 обсуждается в рамках подготовки будущей миссии “Луна-27” [23].

6.2. Имплантированный водород и фотоэмиссионные свойства лунного реголита

Данные Lunar Reconnaissance Orbiter [44] 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 лунном реголите может по-разному влиять на фотоэлектрические свойства лунного реголита и параметры плазменно-пылевой системы над Луной [45]. 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.

6.3. Отрыв пылевых частиц от поверхности Луны

Открытой является проблема, связанная с условием отрыва пылевой частицы от поверхности Луны под действием электростатических сил. Чтобы оторвать микрометровую или субмикронную частицу от лунной поверхности электростатической силой необходимо, чтобы, либо ее заряд был очень большим, либо электрическое поле имело очень большое значение напряженности. Однако имеющиеся данные этого не подтверждают. Попытки решить этот вопрос рассматривались в работах [46–50], но все же он остается до сих пор открытым. В последнее время были предложены пути преодолеть эту проблему, например [15, 51, 52], тем не менее нельзя считать, что эта проблема решена.

6.4. 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 [53]. Кроме того, возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждение которых может, например, происходить в окрестности лунного терминатора [56]. 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 [20, 55] 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 [32, 56, 57].

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.

6.5. Магнитное пересоединение

Процессы магнитного пересоединения в земной магнитосфере возможны в областях, расположенных как вблизи Земли, так и на расстояниях от нее, составляющих десятки, а то и сотни земных радиусов [58]. Таким образом, Луна находится в области, где может происходить магнитное пересоединение, а плазменная турбулентность [32, 56, 57], присутствующая в области взаимодействия хвоста магнитосферы Земли с Луной, может влиять на характер магнитного пересоединения. Типичной моделью для описания магнитного пересоединения является модель диффузии Паркера–Свита [59, 60], модифицированная с учетом аномальной диссипации [61]. В этой модели магнитное пересоединение рассмат-

ривается как результат взаимной диффузии магнитных полей в магнитосфере Земли, которые предполагаются противоположно направленными. Ширина переходного слоя зоны пересоединения определяется выражением

$$d \approx \frac{c}{\omega_{pe}} \left(\frac{L v_{\text{eff}}}{v_A} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где c – скорость света, ω_{pe} – электронная плазменная частота, L – характерный масштаб неоднородности вдоль направления переходного слоя, v_{eff} – эффективная частота столкновений, характеризующая аномальную (из-за плазменной турбулентности) потерю импульса иона, v_A – альфвеновская скорость. Величина L обычно составляет от 5 до 10 земных радиусов. Для ионно-звуковой турбулентности имеем $d \sim 1$ км [57]. Эта величина намного меньше диаметра Луны. Ожидается, что ускорение плазмы, происходящее вследствие процессов магнитного пересоединения, может привести к возникновению свечения в некоторых областях над поверхностью Луны.

6.6. Влияние посадочного аппарата на окружающую среду

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.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, особенностью окололунного пространства является наличие плазменно-пылевой системы. Эта система является важным объектом современных исследований Луны. В России планируются миссии “Луна-25” и “Луна-27”. Посадочные модули космических аппаратов “Луна-25” и “Луна-27” будут оснащены приборами для

изучения свойств пыли и пылевой плазмы над лунной поверхностью. В связи с будущими лунными миссиями “Луна-25” и “Луна-27” в Институте космических исследований РАН проводились самосогласованные исследования, в которых рассматривалась плазменно-пылевая система в приповерхностном слое Луны. Данная работа представляет краткое описание этих исследований. Затрагиваются проблемы формирования пылевой плазмы над освещенной частью Луны, в области лунного терминатора, влияния магнитных полей на окололунную пылевую плазму, влияния на результаты измерений посадочного модуля космического аппарата. Несмотря на достаточно долгую историю изучения окололунной пылевой плазмы, все еще существуют нерешенные проблемы. Ряд таких проблем сформулирован в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popel S.I., Zelenyi L.M. // J. Plasma Physics. 2013. V. 79. P. 405.
2. Popel S.I., Zelenyi L.M. // J. Plasma Physics. 2014. V. 80. P. 885.
3. Popel S.I., Golub' A.P., Kassem A.I., Zelenyi L.M. // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. P. 013701.
4. Попель С.И., Голубь А.П., Кассем А.И., Зеленый Л.М. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 451.
5. Dusty plasmas: physics, chemistry and technological impacts in plasma processing / ed. A. Bouchoule. N.Y.: John Wiley and Sons Inc., 1999. 408 p.
6. Shukla P.K., Mamun A.A. Introduction to dusty plasmas physics. Bristol: IOP Publishing, 2002. 265 p.
7. Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A. Physics and applications of complex plasmas. London: Imperial College Press, 2005. 500 p.
8. Tsytovich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H. Elementary physics of complex plasmas. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 370 p.
9. Попель С.И. Лекции по физике пылевой плазмы. М.: МФТИ, 2012. 160 с.
10. Фортвов В.Е., Батурич Ю.М., Морфилл Г.О., Петров О.Ф. Плазменный кристалл. Космические эксперименты. М.: Физматлит, 2015.
11. Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu. // Planet. Space Sci. 2018. V. 156. P. 71.
12. Зеленый Л.М., Попель С.И., Захаров А.В. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 441.
13. 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.
14. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. P. 455.
15. Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманич Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 641.
16. Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 594.

17. 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 в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 379.
18. Голубь А.П., Попель С.И. // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. С. 393.
19. Колмогоров А.Н. // ДАН. 1941. Т. 31. С. 99.
20. Colwell J.E., Batiste S., Horanyi M., Robertson S., Sture S. // Rev. Geophys. 2007. V. 45. P. RG2006.
21. Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И. // ДАН. 2007. Т. 415. С. 247.
22. Park J., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A. // J. Aerospace Engineering. 2008. V. 21. P. 266.
23. 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.
24. Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M. // Europ. Phys. J. D. 2014. V. 68. P. 245.
25. Walbridge E. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 3668.
26. Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B. Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space / Ed. R.J.L. Grard, D. Reidel, Dordrecht, 1973. P. 389.
27. Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 59.
28. Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. No. 12. P. 123701.
29. Чен Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987. С. 277.
30. Rennilson J.J., Criswell D.R. // The Moon. 1974. V. 10. P. 121.
31. Borisov N., Mall U. // Planet. Space Sci. 2006. V. 45. P. 572.
32. Popel S.I., Kassem A.I., Izvekova Yu.N., Zelenyi L.M. // Phys. Lett. A. 2020. V. 384. P. 126627.
33. Hones Jr. E.W. // Aust. J. Phys. 1985. V. 38. P. 981.
34. Harada Y. Interactions of Earth's Magnetotail Plasma with the Surface, Plasma, and Magnetic Anomalies of the Moon. Springer, 2015.
35. Dyal P., Parkin C.W., Daily W.D. // Rev. Geophys. 1974. V. 12. P. 568.
36. Coleman Jr. P.J., Schubert G., Russell C.T., Sharp L.R. // Moon. 1972. V. 4. P. 419.
37. Le Bars M., Wiczeorek M.A., Karatekin Ö., Cébron D., Laneuville M. // Nature. 2011. V. 479. P. 215.
38. Wiczeorek M.A., Weiss B.P., Stewart S.T. // Science. 2012. V. 335. P. 1212.
39. Wiczeorek M.A. // J. Geophys. Res.: Planets. 2018. V. 123. P. 291.
40. Попель С.И., Морозова Т.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. No. 5. С. 474.
41. Kuznetsov I.A., Hess S.L.G., Zakharov A.V., Cipriani F., Seran E., Popel S.I., Lysin E.A., Petrov O.F., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Kopnin S.I. // Planetary Space Sci. 2018. V. 156. P. 62.
42. Харлоу Ф.Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
43. Hess S.L.G., Sarraih P., Matèo-Vèlez J.-C., Jeanty-Ruard B., Cipriani F., Forest J., Hilgers A., Honary F., Thièbault B., Marple S.R., Rodgers D. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. V. 43. P. 2799.
44. Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev 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.
45. Дубинский А.Ю., Попель С.И. // Космические исследования. 2019. Т. 57. С. 93.
46. Sheridan T.E., Goree J., Chiu Y.T., Rairden R.L., Kiessling J.A. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 2935.
47. Flanagan T.M., Goree J. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 123504.
48. Sheridan T.E., Hayes A. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 091501.
49. Hartzell Ch.M., Scheeres D.J. // Planetary Space Sci. 2011. V. 59. P. 1758.
50. Sheridan T.E. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 143304.
51. Wang X., Schwan J., Hsu H.-W., Grün E., Horanyi M. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 6103.
52. Rosenfeld E.V., Zakharov A.V. // Icarus. 2020. V. 338. P. 113538.
53. Popel S.I., Morfill G.E., Shukla P.K., Thomas H. // J. Plasma Phys. 2013. V. 79. No. 6. P. 1071.
54. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 867.
55. 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. 05215.
56. Морозова Т.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 474.
57. Izvekova Yu.N., Morozova T.I., Popel S.I. // IEEE T. Plasma Sci. 2018. V. 46. P. 731.
58. Phan T.D., Gosling J.T., Davis M.S., Skoug R.M., Øieroset M., Lin R.P., Lepping R.P., McComas D.J., Smith C.W., Reme H., Balogh A. // Nature. 2006. V. 439. P. 175.
59. Parker E.N. // J. Geophys. Res. 1957. V. 62. P. 509.
60. Sweet P.A. The Neutral Point Theory of Solar Flares. In: Electrostatic Phenomena in Cosmical Physics, London: Cambridge University Press, 1958. P. 123.
61. Tsytovich V.N. Lectures on Non-linear Plasma Kinetics, Berlin: Springer-Verlag, 1995.