

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

**Физические процессы формирования и особенности
плазменно-пылевой экзосферы Луны**

Л.М. Зелёный, А.В. Захаров, С.И. Попель, И.А. Кузнецов, Е.В. Розенфельд

Обзор посвящён исследованию физических процессов, связанных с воздействием внешних факторов космического пространства: потоков микрометеороидов, солнечного излучения — на лунный реголит. Под влиянием этих факторов микрочастицы реголита могут отрываться от поверхности и левитировать. Приповерхностная плазма и левитирующие пылевые частицы формируют плазменно-пылевую экзосферу Луны. При антропогенном воздействии на лунную среду заряженные левитирующие микрочастицы могут оказывать крайне негативное влияние на инженерные системы посадочных аппаратов, деятельность и здоровье астронавтов, находящихся на Луне. В статье анализируются современные представления о физических процессах у поверхности Луны на основе сведений, полученных автоматическими и пилотируемыми лунными аппаратами, а также при проведении лабораторных экспериментов. Рассмотрены нерешённые проблемы, связанные с плазменно-пылевой экзосферой Луны, намечены основные пути их решений.

Ключевые слова: Луна, плазма, лунная пыль, солнечный ветер, микрометеороиды, реголит, экзосфера

PACS numbers: 52.27.Lw, 96.12. – a, 96.20. – n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.09.039567>

Содержание

1. Введение (569).
 2. Формирование и свойства реголита Луны (571).
 - 2.1. Внешние воздействия на Луну.
 - 2.2. Свойства реголита.
 3. Экзосфера Луны (575).
 - 3.1. Ионосфера и атмосфера Луны.
 - 3.2. Процессы на поверхности реголита при воздействии внешних факторов.
 - 3.3. Приповерхностная плазменно-пылевая среда.
 - 3.4. Приповерхностные электрические и магнитные поля.
 4. "Токсичность" лунной пыли (590).
 - 4.1. Воздействие естественной лунной среды.
 - 4.2. Особенности антропогенного фактора.
 5. Нерешённые проблемы динамики лунных плазменно-пылевых процессов (593).
 6. Вместо заключения (594).
- Список литературы (597).

Л.М. Зелёный^(1,а), А.В. Захаров^(1,б), С.И. Попель^(1,2,с),
И.А. Кузнецов^(1,д), Е.В. Розенфельд^(3,е)

⁽¹⁾ Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики",
ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской 18, 620108 Екатеринбург,
Российская Федерация

E-mail: ^(а) lzelenyi@cosmos.ru, ^(б) zakharov@cosmos.ru,
^(с) popel@iki.rssi.ru, ^(д) kia@cosmos.ru,
^(е) evrosenfeld@gmail.com

Статья поступила 17 июля 2023 г.,
после доработки 18 сентября 2023 г.

1. Введение

Луна была первым внеземным телом, к которому было привлечено внимание пионеров космических исследований. В 1960-х и начале 1970-х годов серия советских и американских автоматических посадочных аппаратов и шесть пилотируемых экспедиций Apollo NASA провели беспрецедентную по своей насыщенности и объёму программу изучения Луны. В результате выполнения большого числа экспериментов были получены уникальные прорывные данные о материале поверхности Луны, её плазменном окружении. С помощью автоматических и пилотируемых экспедиций доставлено на Землю для лабораторных исследований более 300 кг образцов лунного вещества. Использование луноходов и непосредственная деятельность человека на поверхности Луны играли роль своеобразных активных экспериментов, позволивших получить богатый опыт исследований лунной природной среды.

Одним из самых неожиданных результатов этих исследований стало обнаружение свечения над поверхностью Луны (безатмосферного небесного тела) в районе терминатора [1, 2]. Такое свечение было зарегистрировано несколькими телевизионными камерами, установленными на российских и американских автоматических посадочных аппаратах, и астронавтами при орбитальном движении пилотируемых аппаратов вокруг Луны. Интерпретация свечения над лунным горизонтом (Lunar Horizon Glow, LHG) привела к выводу, что солнечный свет рассеивается на микрочастицах лунной пыли, левитирующих над поверхностью. На первый взгляд может показаться, что появление заметного количества пыли над поверхностью безатмосферного не-

бесного тела должно свидетельствовать либо о высокой метеоритной активности, либо об интенсивной вулканической деятельности на Луне. Однако эксперимент LEAM (Lunar Ejecta and Meteorites) [3] показал, что сильно разреженные, но всё же заметные пылевые облака возникают над поверхностью Луны в области терминатора. Объяснить появление пылевых частиц над поверхностью Луны слабыми сейсмическими колебаниями, вызванными приливными силами из-за эксцентриситета орбиты Луны и/или непрерывными ударами микрометеоритов, не удастся [4–6]. Поэтому было сделано предположение, что наиболее вероятной причиной возникновения подвёмной силы в данном случае является кулоновское взаимодействие.

В течение последних десятилетий проводились теоретические (например, [7–12]) и лабораторные (например, [13, 14]) исследования, направленные на экспериментальное моделирование физических процессов, приводящих к появлению пылевых частиц над поверхностью Луны. Оказалось, что данное явление связано с комплексным воздействием на лунную поверхность внешних факторов — потоков микрометеоритов и солнечного излучения. Указанные внешние факторы, постоянно в течение предшествующих геологических эпох и в настоящее время воздействуя на поверхность лишённой атмосферы Луны, измельчают и в некоторой степени химически преобразовывают лунный грунт. В результате таких процессов формируется реголит, значительная часть которого представляет собой частицы микронного и субмикронного размеров, называемые лунной пылью. Доминирующую роль здесь играют ударные процессы при бомбардировке высокоскоростными микрометеороидами. Реголит является хорошим изолятором [15, 16], поэтому в результате воздействия ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца и потоков плазмы солнечного ветра освещённая поверхность реголита приобретает положительный электрический заряд (при спокойном Солнце), а над ней формируется облако фотоэлектронов, создавая приповерхностное электрическое поле и так называемый двойной плазменный слой. Кулоновские силы F_e в электрическом поле этого слоя, воздействуя на микрочастицы лунной пыли, преодолевают силы адгезии Ван-дер-Ваальса F_a и гравитационную силу F_g , действующие на частицы, способны оторвать их (lofting) от поверхности реголита, и при $F_e \sim F_g$ пылевые частицы могут левитировать над поверхностью Луны, создавая приповерхностную плазменно-пылевую среду — лунную экзосферу. Солнечный свет, рассеиваясь на взвешенных над поверхностью частицах, создаёт свечение, которое можно наблюдать при определённых условиях. Однако до сих пор механизм появления электростатических сил, способных оторвать микрочастицу от поверхности реголита, остаётся дискуссионным [6].

При выполнении пилотируемой программы Apollo американские астронавты сообщали, что левитирующие заряженные пылевые частицы могут быть крайне агрессивны. Воздействуя на чувствительные элементы служебных систем и научную аппаратуру посадочных аппаратов, например, тепловые радиаторы, элементы солнечных батарей, оптические поверхности, такие частицы могут нарушать их нормальную работу и даже выводить из строя. Кроме того, американские астронавты сообщали, что лунная пыль способна проникать через герметичные уплотнители, отрицательно влияя на ра-

боту астронавтов на поверхности Луны, попадая в лёгкие, на тело человека, вызывая раздражения кожи, глаз [17]. Данное свойство микрочастиц лунной пыли иногда определяют как токсичность (см., например, [18]).

В результате анализа наблюдений за свечениями над поверхностью Луны, результатов измерений потенциала поверхности реголита, а также выполненных теоретических исследований и лабораторного моделирования удалось многое понять в динамике плазменно-пылевых процессов на Луне. Однако остаётся множество нерешённых проблем.

Кратко условия у поверхности Луны можно охарактеризовать следующим образом:

- пониженная гравитация ($1,622 \text{ м с}^{-2}$, приблизительно $1/6$ земной);

- глубокий вакуум (примерно 10 нПа), концентрация частиц у поверхности Луны на 15 порядков меньше, чем у Земли;

- реголит испытывает воздействие потоков интенсивного солнечного электромагнитного излучения, плазмы солнечного ветра, а также высокоэнергичных заряженных частиц (проникающая радиация на Луне в $200–1000$ раз выше, чем на Земле);

- на поверхности реголита в зависимости от рельефа существует резкая граница света и тени (почты нет полутеней);

- угол наклона оси вращения Луны к плоскости эклиптики ($88,5^\circ$) приводит к наличию полностью затенённых и постоянно освещённых участков в её полярных областях;

- глубокие перепады суточной температуры — до 300 К ($\sim 400 \text{ К}$ днём и $\sim 100 \text{ К}$ ночью);

- присутствие над поверхностью реголита заряженных пылевых частиц, характерный размер которых составляет от десятков нанометров до сотен микрометров;

- под действием УФ-излучения и потоков плазмы солнечного ветра на поверхности Луны формируется положительный электрический потенциал в несколько вольт на освещённой стороне и отрицательный — до сотен вольт на затенённой стороне; при пересечении Лунной геомагнитного хвоста потенциал на ночной стороне может достигать нескольких киловольт;

- лунная пыль, сформированная при разрушении коренных пород в результате столкновений с высокоскоростными микрометеороидами, представляет собой измельчённые микрочастицы нерегулярной формы с резкими краями (подобно измельчённому стеклу), средний размер которых (определённый по массе в предположении их сферичности) составляет десятки микрометров;

- область терминатора и неоднородности поверхности с резкими границами света и тени представляют собой особые области в распределении поверхностного потенциала и приповерхностных электрических полей.

В последние годы космические агентства стран "космического клуба" планируют возобновление исследований и возможное последующее освоение Луны. В связи с этим значительно возрастает интерес к более глубокому изучению физических процессов, связанных с динамикой лунной пыли, её влиянием на посадочные аппараты и их инженерные системы. Возникает потребность развития технологий, направленных на снижение негативного воздействия лунной пыли на посадочные аппараты, на деятельность космонавтов и их здоровье.

В обзоре приводится анализ физических процессов, связанных с особенностью формирования и динамики лунной пыли в естественных условиях на Луне. Рассматриваются внешние факторы, в результате воздействия которых формируется реголит и его наиболее мелкая составляющая — лунная пыль. Обсуждаются свойства реголита, рассматриваются физические процессы, происходящие при формировании приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы в естественных условиях. Результаты выполнения в 1968–1972 гг. шести пилотируемых экспедиций по программе NASA Apollo с посещением астронавтами поверхности Луны показали, что физические процессы в приповерхностных областях Луны, вызванные антропогенной деятельностью, приводят к гораздо более активной динамике лунной пыли и возмущениям параметров приповерхностной экзосферы, по сравнению с динамикой пылевых частиц в естественном природном состоянии. Приводятся примеры влияния возмущений плазменно-пылевой экзосферы, вызванных антропогенной активностью, на служебные системы посадочных аппаратов, на деятельность и здоровье астронавтов. Обсуждаются нерешённые проблемы, ключевые для понимания физических явлений при формировании и динамике плазменно-пылевой экзосферы Луны. В последнем разделе рассмотрены направления развития исследований и предстоящие эксперименты *in situ* (в том числе отечественные) по изучению плазменно-пылевой экзосферы и динамики микрочастиц лунной пыли над поверхностью Луны.

2. Формирование и свойства реголита Луны

Поверхность Луны, как и поверхность любого безатмосферного тела Солнечной системы, подвержена воздействию внешних факторов: постоянной бомбардировки микрометеороидами, потоков межпланетной плазмы, энергичных космических лучей, солнечного электромагнитного излучения. Эти процессы известны под общим названием *космическое выветривание* (*space weathering*) [19]. Именно космическое выветривание приводит к распылению поверхностного материала и формированию реголита — верхнего измельчённого рыхлого слоя Луны, к его химической эволюции. Подобные процессы эрозии поверхности, по-видимому, происходят на большинстве безатмосферных тел Солнечной системы.

2.1. Внешние воздействия на Луну

Все внешние факторы по своему физическому воздействию на поверхность Луны могут быть разделены на две основные категории: 1) механические — случайные удары микрометеороидов о поверхность тела и 2) электромагнитные — воздействие на поверхность электромагнитного излучения Солнца, частиц плазмы солнечного ветра, магнитосферной плазмы при пересечении Луной удалённой части геомагнитного хвоста магнитосферы, а также энергичных частиц солнечного или галактического происхождения. Внешние воздействия определяют свойства реголита, приповерхностной экзосферы и в значительной степени приводят к изменению рельефа поверхностей [20, 21].

2.1.1. Микрометеороиды. В результате ударных воздействий микрометеороидов в течение миллиардов лет силикатная основа поверхности Луны измельчается,

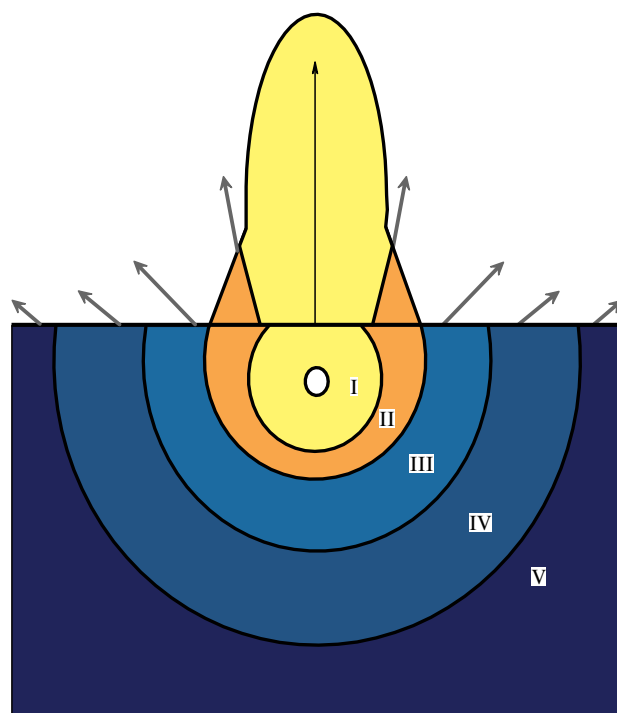


Рис. 1. Схема, характеризующая формирование под лунной поверхностью зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), зоны нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), зоны линейных упругих деформаций вещества реголита (V). Круг в зоне (I) представляет невозмущённый метеороид в эквивалентном центре метеороидного взрыва. Линии из каждой зоны I–V характеризуют выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны. Теми же оттенками, что и соответствующие зоны, показаны выбросы вверх испарённого и расплавленного вещества.

превращаясь в частицы с широким распределением по размерам. Скорость микрометеороидов на расстояниях от Солнца порядка одной астрономической единицы может быть в диапазоне $10–70 \text{ км с}^{-1}$ [22]. Поэтому их взаимодействие с реголитом носит взрывной характер, и вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва [23], в зависимости от происходящих при этом процессов, формируется несколько характерных зон [24]. Схема формирования под лунной поверхностью зон испарения вещества при высокоскоростном ударе представлена на рис. 1.

Большинство частиц выброса имеет начальную скорость ниже скорости убегания с Луны ($2,4 \text{ км с}^{-1}$) и по баллистическим траекториям возвращается на поверхность. Вторичные частицы микронного и субмикронного размера, которые выбрасываются со скоростью, близкой к скорости убегания, образуют сильно изменчивое, но постоянно присутствующее пылевое облако вокруг Луны. Такие разреженные облака наблюдались космическим аппаратом LADEE у Луны [25], а также аппаратом Galileo вокруг четырёх спутников Юпитера [26].

Учитывая высокую скорость удара и взрывную природу их образования, частицы характеризуются крайне нерегулярной формой с заострёнными краями, либо конгломератами, спёкшимися при больших температурах, либо каплями, напоминающими сферы. Такие многократно повторяющиеся ударные воздействия микро-

метеоритами различных размеров перемешивают и перерабатывают предварительно сформированные частицы реголита и перемещают их на различные глубины за время геологических эпох. Поток микрометеоритов кометного и астероидного происхождения, падающих на Луну, оценивается около 10^6 кг в год [27, 28]. Основной вклад в поток по массе вносят частицы, имеющие размеры от 10 нм до 1 мм [22]. При высокоскоростном ударе микрометеороидов о поверхность Луны происходит взрыв с образованием кратера на поверхности. При этом из кратера выбрасывается вещество реголита, масса которого может в 1000 раз превышать массу самого "ударника" [29, 30]. Значительная доля выбрасываемого вещества возвращается обратно на лунную поверхность, формируя слой реголита. Вторичные частицы микронного и субмикронного размера, выброшенные при ударе микрометеорита, у которых скорость вылета превышает первую космическую для Луны ($v_1 = 1,68 \text{ км с}^{-1}$), формируют пылевое облако вокруг Луны [28, 31]. При скорости выброса $v_2 \geq 2,4 \text{ км с}^{-1}$ вторичные частицы навсегда покидают Луну. Осаждение пылевых частиц на лунную поверхность при бомбардировке её микрометеоритами и образовавшимися вторичными частицами со скоростью меньше v_1 оценивается ~ 800 частиц/м² в год для частиц с размером более 1 мкм [29].

В программе исследований китайского лунного посадочного аппарата Chang'e-3, выполнявшего исследование в 2013–2014 гг., проводилась оценка осаждения пылевых частиц на элемент солнечной батареи площадью 0,33 см² по измерениям параметров электрического сигнала от этого датчика [32, 33]. Элемент солнечной батареи находился на высоте ~ 2 м от поверхности реголита. Измерения показали, что масса пыли, оседающей на единицу измерительной поверхности датчика за год, составляет 21,4 мкг см⁻², что соответствует средней за год плотности потока микрочастиц $\sim 0,68 \times 10^{-12} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Сравнение полученных результатов с анализом механизмов подъёма пылевых частиц с поверхности реголита [34] показало, что основной вклад по массе в наблюдаемые потоки пылевых частиц могли вносить микрометровые частицы, происхождение которых обусловлено выбросами вещества реголита с лунной поверхности в результате ударов микрометеороидов. Однако теоретическая оценка оказалась в несколько раз больше измеренного в рамках миссии Chang'e-3 значения массопереноса пылевых частиц. Подобное различие экспериментальных данных и существующих моделей требует дополнительного анализа.

2.1.2. Межпланетная плазма. Ещё одним важным фактором внешнего воздействия на поверхность Луны является межпланетная плазма — солнечный ветер — истекающий из солнечной короны поток электронов и протонов, содержащий также $\sim 4\%$ ядер гелия, элементы группы инертных газов и их различных изотопов, ядра C, N и незначительное количество других ядер. Вещество солнечного происхождения, имплантированное в реголит, является некоторым дополнительным вкладом в содержание редких элементов [35], наряду с метеороидами, астероидами, кометами, которые являются основными внешними источниками редких элементов на Луне. Энергия ионов солнечного ветра относительно невелика (~ 1 кэВ), поэтому они проникают

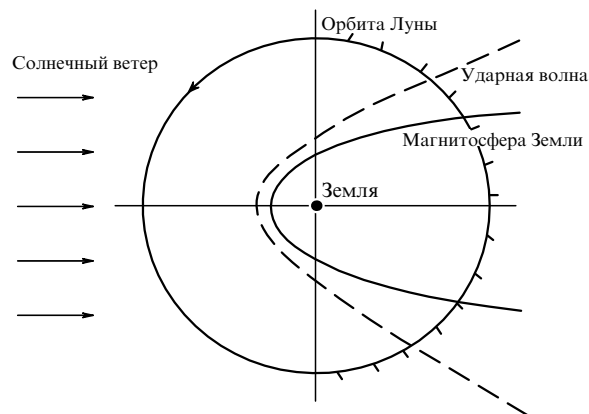


Рис. 2. Схематическое изображение орбиты Луны, ударной волны и границы магнитосферы Земли в плоскости, близкой к эклиптике. Отметки на части орбиты Луны указывают интервалы, которые Луна проходит за время, равное земным суткам.

только в самый верхний слой реголита толщиной не более микрона, вызывая в некоторых случаях распыление (sputtering). Возможны также радиационные повреждения вещества реголита — превращение кристаллической структуры в аморфную [36]. Средняя скорость частиц спокойного солнечного ветра составляет приблизительно 400 км с^{-1} , но может значительно меняться в зависимости от активности Солнца. Поток ионов солнечного ветра в среднем составляет $4,5 \times 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и крайне изменчив во времени [37]. С учётом того что порядка 95% ионов составляют протоны, такой поток составляет $8,5 \times 10^{-15} \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, общая величина солнечного вещества, имплантируемого в лунный реголит, составляет $4,3 \times 10^{25}$ частиц в секунду, или $0,081 \text{ кг с}^{-1}$ (интересно заметить, что это приблизительно в четыре раза больше потока микрометеороитов на Луну).

При орбитальном движении вокруг Земли Луна пересекает протяжённый магнитосферный хвост Земли и, таким образом, приблизительно треть лунных суток (т.е. ~ 9 земных суток) Луна оказывается под воздействием магнитосферной плазмы. Схема орбитального движения Луны, при котором она пересекает головную ударную волну и геомагнитный хвост, представлена на рис. 2. Структура земной магнитосферы достаточно сложна, она крайне динамична и во многом зависит от параметров солнечного ветра и активности Солнца. Внешние зоны магнитосферы Земли во многом определяются параметрами солнечного ветра, концентрация которого на 1 а.е. около 10 см^{-3} . При пересечении магнитопаузы (границы земной магнитосферы) Луна попадает в плазму магнитосферного хвоста и может оказаться либо в одной из долей хвоста (tail lobes), либо в низкоширотном пограничном слое, либо в плазменном слое (plasma sheet) [38, 39]. В северной и южной долях хвоста концентрация плазмы очень мала $10^{-3} - 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ [40]. В плазменном слое магнитосферного хвоста, разделяющем северную и южную доли, концентрация плазмы составляет $0,05 - 0,2 \text{ см}^{-3}$, но характеризуется высокой температурой ионов (1–5 кэВ) и сильно изменчивой скоростью ($10 - 1000 \text{ км с}^{-1}$) [41]. Плазменные инструменты миссий Apollo 12 и 15 позволили получить важную информацию о влиянии магнитосферной плазмы на поверхность Луны [42, 43]. Модельные исследования

влияния магнитосферной плазмы на электрический заряд лунной поверхности и динамику пылевых частиц, присутствующих над поверхностью, выполнены в работе [44].

При возрастании солнечной активности в атмосфере Солнца возникают условия для ускорения заряженных частиц — солнечных космических лучей (СКЛ). Энергии электронов СКЛ обычно более 2 кэВ, энергии ядер — десятки кэВ/нуклон. Максимальная энергия протонов СКЛ зависит от уровня активности Солнца и может превышать 10^{10} эВ. В состав СКЛ кроме протонов и электронов входят более тяжёлые ядра, распространённость которых в области высоких энергий совпадает с распространённостью в солнечной короне. Протоны и альфа-частицы СКЛ могут проникать в лунный реголит на глубину до нескольких сантиметров. Тяжёлые ядра СКЛ тормозятся в миллиметровом слое и могут разрушить атомную структуру, создавая следы радиационного повреждения, видимые с помощью электронного микроскопа [36].

Галактические космические лучи (ГКЛ) имеют энергию более 100 МэВ, обычно — порядка нескольких ГэВ, но могут достигать очень больших энергий — порядка 10^{10} ГэВ. При взаимодействии с реголитом тяжёлые ядра ГКЛ, особенно с большим зарядом, вследствие ионизационных потерь тормозятся достаточно быстро, до глубины реголита $\sim 0,1$ м. При этом радиационные воздействия на реголит, вызванные такими ядрами, происходят на глубинах в несколько первых сантиметров. Более лёгкие ядра ГКЛ, в основном протоны и альфа-частицы, проникают в реголит значительно глубже, инициируя каскады частиц в слоях, достигающих нескольких метров. Количество вторичных частиц в таких каскадах намного превышает количество первичных. Доминирующей частицей в каскаде является нейтрон с энергией ниже ~ 100 МэВ в основном из-за отсутствия у него ионизационных потерь [45].

Процессы радиационной модификации реголита, происходящие на различных временных интервалах, приводят к изменениям, которые при исследовании образцов лунного грунта могут служить своеобразными хронологическими отметками, в совокупности представляющими собой уникальную и весьма обширную информацию, имеющую большое значение для решения широкого круга фундаментальных вопросов, таких как история раннего развития Солнечной системы, природа солнечного ветра и состав Солнца, крупномасштабная динамика радиационных потоков в Солнечной системе, радиационная история лунных пород.

2.1.3. Электромагнитное излучение Солнца. Воздействие электромагнитного излучения Солнца, и особенно его ультрафиолетовой составляющей спектра [46], на поверхность Луны играет важную роль в фотоэмиссии верхнего слоя реголита. Фотоэмиссия приводит к приобретению положительного заряда на освещённой части поверхности Луны и формированию двойного слоя приповерхностного электростатического поля.

Циклы солнечной активности оказывают наибольшее влияние на отклонение величины потока солнечного излучения от среднего значения [47]. Причём варибельность потока увеличивается с уменьшением длины волны, достигая нескольких процентов при 200–250 нм и нескольких десятков процентов, и даже более, для волн

короче 200 нм. Следствия фотоэмиссии освещённой поверхности лунного реголита будут рассматриваться в разделе 3.2.

2.2. Свойства реголита

Основная информация о лунном реголите получена в результате исследований его образцов, доставленных на Землю в 1960-х и начале 1970-х гг. в результате выполнения пилотируемой программы Apollo и автоматическими аппаратами "Луна-16", "Луна-20" и "Луна-24". Почти через полвека, в 2020 г., китайская миссия Chang'e-5 также доставила на Землю образцы лунного реголита для лабораторных исследований [48]. Все образцы лунного реголита были доставлены из приэкваториальных и средних широт видимой стороны Луны и возвышенностей. Образцы анализировались по обширным программам литологических, минералогических, элементных, гранулометрических, физических и др. исследований (см., например, [31, 49–51]).

Верхний слой реголита (несколько миллиметров) представляет собой пористую ($> 80\%$) структуру [52]. С глубиной плотность реголита увеличивается, и инфракрасные (ИК) измерения показывают, что характеристики верхних $\sim 0,1$ м реголита приблизительно одинаковы по всей поверхности Луны, за исключением недавно сформированных ударных кратеров [53]. Объёмная плотность реголита составляет от 1,04 до 1,90 г см⁻³ для различных образцов [4, 54, 55].

2.2.1. Химический состав. Лабораторный анализ образцов, доставленных на Землю, показывает, что лунная порода обычно состоит из пироксена, плагиоклаза, ильменита, оливина, с небольшим содержанием множества других минералов [56]. Формирование такого состава может происходить вследствие ударных процессов при микрометеорной бомбардировке. Химический состав лунной пыли изменяется по всей лунной поверхности, но в среднем составляет около 50 % SiO₂, 15 % Al₂O₃, 10 % CaO, 10 % MgO, 5 % TiO₂ и 5–15 % железа [57].

Ключевой особенностью лунного реголита является присутствие большего, чем ожидалось, количества элементарного, полностью восстановленного металлического железа [58]. Происхождение такого, так называемого нанофазного металлического железа (np-Fe⁰), связано с высокоскоростными ударами микрометеоритов. При этом в результате выделения энергии, кроме механического разрушения, материал лунной поверхности подвергается ударному плавлению (shock melting) и испарению, что приводит к восстановлению оксида железа (Fe₂O₃) до металлического железа [57, 59, 60]. Металлическое железо в лунном грунте и частицах пыли можно увидеть в виде отложений размером ~ 10 нм вблизи края частиц с помощью просвечивающей электронной микроскопии [61, 62] либо с помощью ферромагнитного резонанса [63]. Как правило, отложения нанофазного железа обнаруживаются в агрегатах с высоким содержанием SiO₂, спёкшихся при высокоскоростных ударах микрометеороидов [61, 62]. В таком виде нанофазное железо не может влиять на химическую активность лунной пыли до тех пор, пока эти стекловидные области не будут разрушены. Именно по данной особенности легко различить лунные породы и их наземные аналоги. Недавно выполненные исследования с китайского лунного посадочного

аппарата Chang'e-5 позволили получить новые данные о распространённости нанофазного железа в лунном реголите [64, 65].

2.2.2. Гранулометрический состав. В силу того что реголит является результатом ударного метаморфизма, большая его часть представляет собой мелкие и неконсолидированные обломки подстилающих кристаллических горных пород, покрывающих всю лунную поверхность. Более четверти (по массе) лунных частиц реголита представляют собой брекчии и агрегаты из более мелких частиц почвы (glass-bounded aggregates), связанные стеклом, образованным из силикатов при высокоскоростном ударе микрометеороидов [66]. Брекчия — это крупнозернистая порода, полученная в результате ударной фрагментации, состоящая из фрагментов породы, спекшейся при высокой температуре. Толщина слоя переработанного реголита составляет обычно 4–5 м в области лунных морей и 10–15 м в гористых районах [66, 67].

Образцы лунного реголита, доставленные по программе Apollo, получены в основном с поверхности (80–90%), а также на глубинах от 0,3 до 0,6 м, и распределения частиц по размерам во многом идентичны [68]. Частицы с размером < 1 мм составляют более 95% массы реголита. Наиболее мелкий компонент реголита, менее 100 мкм, определяют как лунную пыль. Средний размер частиц находится в диапазоне от 40 до 100 мкм. Такие частицы составляют порядка половины веса лунного реголита, при этом большая его часть по массе имеет размеры от 45 до 80 мкм [66, 68]. Для несферических частиц под "размером" частицы обычно понимают диаметр эквивалентной сферы или окружности [31].

Гранулометрический состав частиц исследовался различными методами, которые включали калиброванное сито, лазерный анализ, метод аэрозольной диагностики, анализ изображений, полученных сканирующим электронным микроскопом (Scanning Electron Microscope, SEM) и др. На рисунке 3 для примера представлено распределение пылевых частиц по размерам для образца № 24176, доставленного автоматической станцией

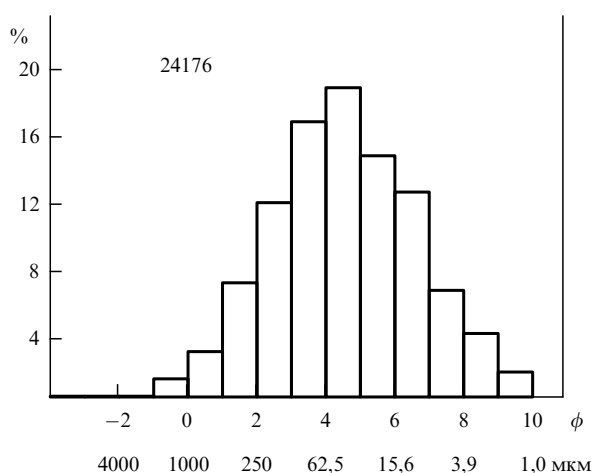


Рис. 3. Гистограмма распределения по размерам образца № 24176 лунного грунта, доставленного на Землю аппаратом "Луна-24". По оси ординат — процент массы исследуемых частиц, по оси абсцисс — размер гранул в мкм и $\phi = -\log_2(d[\text{мм}])$ [69].

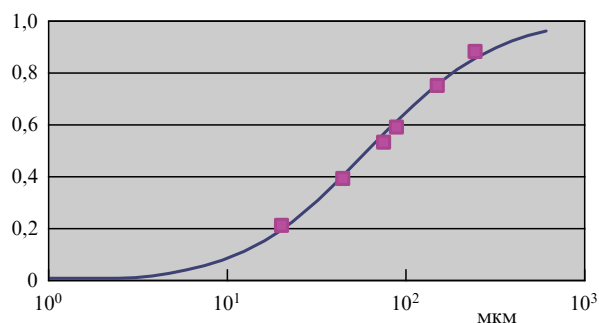


Рис. 4. Теоретическое распределение Колмогорова, описывающее данные наблюдений пылевых частиц на поверхности Луны (сплошная кривая). Точки соответствуют данным, приведённым в работе [5].

"Луна-24" [69]. В этой работе отмечается, что контроль размеров частиц выделяемых фракций проводился с помощью оптического и растрового электронного микроскопов. Результаты проведённого анализа показали, что изученные образцы примерно на 50% состоят из тонкодисперсного материала — частиц размером менее 70 мкм; супертонкая фракция — менее 10 мкм составляет около 10% массы всего анализируемого образца, а наиболее тонкая часть реголита, размером менее 2 мкм, — 1–2% массы [69]. Данные о распределении микрочастиц по размерам имеют важное значение для исследований условий отрыва частиц от поверхности и их дальнейшей динамики, для проектирования эффективных мер систем фильтрации для среды обитания человека, а также для исследований токсикологических эффектов влияния пыли на функции дыхания человека [70].

Несмотря на вариабельность формы слагающих реголит частиц, их распределение по размерам на поверхности Луны удовлетворяет логарифмически-нормальному закону, что оказывается типичным для случая многократного дробления [71]. На рисунке 4 представлены экспериментальные данные распределения частиц по размерам от 20 до 500 мкм для одного из образцов лунного грунта, доставленного на Землю по программе Apollo [5], а также теоретическое распределение Колмогорова.

Представленные на рис. 3 и 4 распределения, а также результаты гранулометрических измерений образцов реголита, доставленных по программе Apollo [49], показывают, что микрочастицы реголита с характерным размером в диапазоне нескольких десятков микрометров вносят основной вклад по массе.

В работе [72] показано, что для случая многократного дробления распределение Колмогорова остаётся справедливым, по крайней мере, для размеров частиц, меньших или порядка 100 нм, что позволяет продлить полученное на основе данных [5] распределение пылевых частиц лунной поверхности и в эту область размеров. Факт возможности продления распределения пылевых частиц в сторону меньших размеров вплоть до субмикрометровых и даже нанометровых величин весьма существен при теоретическом описании пылевой плазмы над лунной поверхностью [73].

2.2.3. Форма частиц тонкой фракции лунного грунта. Форма пылевых частиц, как правило, крайне нерегулярна, с ярко выраженными заострёнными краями, что очень отличает их от земных аналогов. Плотность

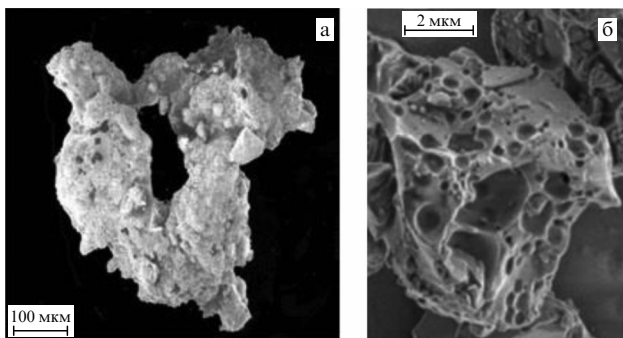


Рис. 5. Фотографии двух частиц тонкой фракции лунного реголита. (а) Пористое стекло с вкраплениями частиц реголита и железа. (б) Частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонент при формировании в результате плавления [74].

отдельных частиц обычно принимают равной $2,7 - 3,0 \text{ г см}^{-3}$ [4]. В работе [74] представлена богатая коллекция изображений частиц лунного реголита. На рисунке 5 из этой коллекции изображений для примера представлен типичный образец агглютината — пористое стекло с вплавленными частицами породы и железа. Все пылевые частицы могут быть морфологически классифицированы на четыре типа: 1) блоки неправильной формы с острыми углами, 2) осколки (чешуйки) стекла, 3) нерегулярные (пористые, "швейцарский сыр"), 4) сферические, причём подчёркивается, что частицы нерегулярной формы, как правило, имеют заострённые углы [70]. Форма частиц в основном продолговатая, что приводит к преимущественному слипанию отдельных частиц вдоль их продольных осей. Следствием такой особенности тонкой фракции реголита является анизотропия физических свойств [75].

2.2.4. Электрофизические свойства реголита. Электрические свойства пылевых частиц и основной части силикатов лунного реголита при нулевой освещённости характеризуются чрезвычайно низкой электрической проводимостью порядка $10^{-14} \text{ См м}^{-1}$ (для реголита) и $10^{-9} \text{ См м}^{-1}$ (для консолидированной лунной породы) [4, 76]. Электропроводность реголита сильно зависит от температуры. Средняя температура поверхности составляет 380 К на освещённой поверхности и 120 К в ночное время, причём в полярных областях диапазон возможных температур поверхности может значительно расширяться [76]. Исследования влияния облучения на электропроводность реголита показывают, что относительно значения электропроводности в темноте поверхностная электропроводность увеличивается примерно в 10 раз при облучении в ИК-диапазоне и в 10^6 раз при облучении в УФ-диапазоне [77].

Относительная диэлектрическая проницаемость определяется плотностью реголита ρ и составляет приблизительно $1,9^\rho$, где ρ в г см^{-3} [4], и не зависит от минералогического состава реголита. Высокочастотные электромагнитные потери определяются тангенсом угла потерь (отношение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости к действительной), зависят от плотности ρ и содержания ($\text{TiO}_2 + \text{FeO}$) и для лунного реголита очень малы. Чрезвычайно низкая электропроводность и малые значения тангенсов угла потерь указывают на то, что лунный реголит слабо поглощает электромагнитную

энергию. Например, радиосвязь на Луне возможна через слой лунного грунта около 10 м.

Как известно, Луна не имеет дипольного магнитного поля. Однако на Луне имеются локальные области с намагниченными породами поверхности, так называемые "магнитные аномалии" [78]. Потоки плазмы солнечного ветра, встречая подобные области на поверхности Луны, могут формировать "мини-магнитосферы" [79]. В таких областях взаимодействие плазмы солнечного ветра с поверхностью Луны в значительной степени контролируется локальным магнитным полем (эти вопросы будут рассматриваться в разделе 3.3).

3. Экзосфера Луны

Как известно, Луна лишена заметной атмосферы. Тем не менее существует тонкая атмосфера, представляющая собой бесстолкновительную газовую оболочку, так называемую экзосферу, в которой движение молекул управляется в основном гравитационным полем. Значения концентрации и давления газа у поверхности Луны, по-видимому, сравнимы с аналогичными величинами у поверхностей некоторых других безатмосферных тел Солнечной системы, например, у Меркурия, крупных астероидов, ряда спутников планет-гигантов. Наряду с нейтральной атмосферой существует и ионосфера Луны. Как и в нейтральной лунной атмосфере, химический состав ионосферы определяется взаимодействием с лунной поверхностью.

3.1. Ионосфера и атмосфера

3.1.1. Ионосфера Луны. Первые убедительные доказательства существования ионосферы вокруг Луны были получены в 1970-х годах радиозатменными методами с помощью советских зондов "Луна-19", "Луна-24" [80]. Эти измерения показали, что концентрация ионов может составлять $\sim 100 \text{ см}^{-3}$ [81] с пиковой концентрацией электронов $500 - 1000 \text{ см}^{-3}$ и с характерным высотным масштабом $\sim 10 - 30 \text{ км}$ [82]. Недавние исследования лунной ионосферы с помощью японского спутника Луны Kaguya [83] показали величину усреднённого пика концентрации $\sim 300 \text{ см}^{-3}$ на высоте 15 км с постепенным уменьшением на больших высотах и к поверхности. Такие высокие концентрации не согласуются с предполагаемым физическим механизмом формирования ионосферы, согласно которому, несмотря на достаточно высокую концентрацию экзосферных нейтралов на дневной стороне Луны (10^5 см^{-3}), длительный процесс фотоионизации (10–100 суток) и короткое время ($\sim 1 \text{ с}$) потеря ионов в результате захвата их солнечным ветром, концентрация ионов составляет $\sim 1 \text{ см}^{-3}$ [84]. Существующее противоречие было рассмотрено в статье [85]. В данной работе показано, что фотоэлектроны, испускаемые заряженными пылевыми частицами, находящимися на больших высотах, могут быть ответственны за результаты измерений радиозатменным методом.

Лунная ионосфера содержит ионы из различных источников: ионы, генерируемые лунной атмосферой, ионы солнечного ветра, ионы земной магнитосферы, а также ионы, скоррелированные по времени с сигналами сейсмических детекторов, что позволило позже идентифицировать такие частицы как ионы, связанные с ударами метеороидов [84]. Почти все эти данные были получены в

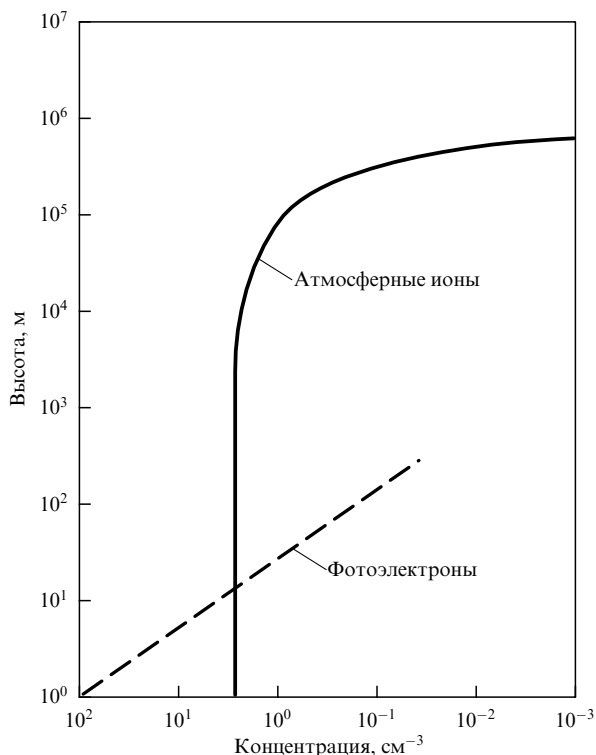


Рис. 6. Зависимости концентраций фотоэлектронов и атмосферных ионов в ионосфере Луны по данным экспериментов SIDE [87].

течение лунного дня. Соотношения масса/заряд ($m/q = 20-28$; $m/q = 40-44$) для ионов, обнаруженных приборами SIDE, были отнесены к ионизированным атомам ^{20}Ne и ^{40}Ar , принадлежащим естественной лунной атмосфере. В предположении аргонового состава атмосферы данные SIDE позволяют описывать лунную атмосферу с помощью экспоненциальной (барометрической) формулы с характерной высотой около 40 км.

Днём, наряду с ионами, вблизи поверхности Луны существует оболочка фотоэлектронов, имеющая толщину в несколько сотен метров [86]. Выше этого слоя находится область ионов, источником которых является нейтральная лунная атмосфера. После образования такие ионы движутся либо в сторону поверхности Луны, либо, наоборот, от неё, ускоряясь вдоль линий межпланетного электрического поля. На рисунке 6 приведены зависимости концентраций фотоэлектронов и атмосферных ионов в ионосфере Луны по данным SIDE [87].

3.1.2. Нейтральная атмосфера Луны. Лунная атмосфера чрезвычайно разрежена. Концентрация газа составляет всего около 2×10^5 молекул см^{-3} в течение лунной ночи, а в течение лунного дня ещё меньше — примерно 10^4 молекул см^{-3} [88]. Учитывая, что это на 14 порядков меньше, чем у земной атмосферы, часто считают, что у Луны вообще нет атмосферы.

Эксперименты по изучению состава и объёмных свойств нейтральной лунной атмосферы проводились во время выполнения программы NASA Apollo [76, 89]. Однако основные представления о лунной атмосфере основаны на теории. Связано это с тем, что общая масса лунной атмосферы составляет очень малую величину, всего 10^4 кг. Приблизительно такую же массу газа выбрасывал каждый посадочный аппарат Apollo при по-

Таблица 1. Концентрация основных составляющих лунной атмосферы на дневной и ночной сторонах Луны [87]

Составляющие атмосферы	Дневное время, см^{-3}	Ночное время, см^{-3}
H_2	4×10^3	$1,2 \times 10^4$
^4He	2×10^3	4×10^4
^{20}Ne	4×10^3	1×10^5
^{36}Ar	1×10^2	3×10^3
^{40}Ar	$1,6 \times 10^3$	4×10^4
CO	3×10^5	$< 10^3$
CO_2	6×10^5	$< 10^3$
CH_4	7×10^4	$< 10^3$
Na	$6,7 \times 10$	
K	$1,5 \times 10$	

Таблица 2. Оценка общей массы наиболее распространённых составляющих лунной атмосферы [87]

Составляющие атмосферы	Масса, кг
CO_2	5200
CO	2000
CH_4	640
Ne, Ar	< 500

садке и взлёте с поверхности Луны. Таким образом, шесть экспедиций Apollo доставили на Луну в шесть раз больше газа, чем масса самой атмосферы [90].

Крупным успехом в исследовании лунной атмосферы оказалось открытие излучения линии D_2 от атомарного K, а затем и Na, сделанное по наблюдениям с Земли в конце 1980-х годов [91, 92]. Общая концентрация Na и K в лунной атмосфере составляет всего $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$. Казалось бы, что эти вещества вносят лишь второстепенный вклад в лунную атмосферу. Однако возможность обнаружения Na и K с Земли делает их очень ценными источниками информации о лунной атмосфере. Наиболее распространённым компонентом лунной атмосферы на дневной стороне Луны является CO_2 , на ночной — Ne. В таблице 1 представлены концентрации основных составляющих лунной атмосферы на дневной и ночной сторонах Луны, полученные по данным измерений, выполненных в экспедициях по программе Apollo, в табл. 2 — общая масса основных составляющих [87].

3.1.3. Источники и потери лунной атмосферы. Для понимания формирования и существования атмосферы важными характеристиками являются источники и механизмы потерь различных атмосферных составляющих. Оценка характерного темпа потерь лунной атмосферы составляет $\sim 10^{-2} \text{ кг с}^{-1}$ [90]. Такая величина (по сравнению с общей массой атмосферы $\sim 10^4 \text{ кг}$) означает, что потери фактически контролируют динамику лунной атмосферы и определяют её равновесную концентрацию.

Идентифицированы не менее четырёх механизмов потерь лунной атмосферы. Прежде всего, это — 1) так называемое *гравитационное убежание* (gravitational escape). Поскольку лунная атмосфера является экзосферой, в которой длина свободного пробега атомов и молекул значительно превосходит характерную высоту атмосферы, атомы или молекулы, удаляющиеся от Луны со

скоростями, превосходящими вторую космическую скорость (для Луны $2,38 \text{ км с}^{-1}$), как правило, уходят в космическое пространство. Следующий механизм потерь — 2) *ионизационные потери*. Такие потери связаны с тем, что ионизированные атомы и молекулы в атмосфере Луны подхватываются в электрическом поле солнечного ветра и ускоряются в нём до скоростей порядка второй космической скорости. Ионизация нейтральных атомов и молекул происходит под воздействием солнечного УФ-излучения и перезарядки. Все эти процессы осуществляются с различной степенью интенсивности в соответствии с 11-летним солнечным циклом и в меньшей степени с 28-дневным вращением Солнца. Кроме того, учитываются 3) *химические потери* и 4) *конденсация*. Наиболее важный вид химических потерь связан со столкновениями атомов и молекул атмосферы с поверхностью Луны, что может приводить к химическим реакциям, связывающим атом или молекулу с поверхностью. Менее важны потери при химических реакциях, происходящих при столкновении молекул газа. Хотя лунная атмосфера и является экзосферой, столкновения атомов все-таки могут происходить. Однако сечения химических реакций, происходящих при парных столкновениях многих составляющих лунной атмосферы (например, $\text{Ag}-\text{X}$, $\text{He}-\text{X}$, $\text{Na}-\text{Na}$, $\text{Na}-\text{K}$, $\text{K}-\text{K}$), довольно низки, что ещё больше снижает (и без того низкую) эффективность данного процесса атмосферных потерь.

Существенным механизмом потерь из лунной атмосферы является потеря из-за конденсации. Процесс конденсации проявляется, например, в результате соударений высокоскоростных метеороидов с лунной поверхностью. Темп таких столкновений (количество в единицу времени) весьма значителен (см., например, [93]). В области эпицентра удара формируется зона испарения вещества, которое поднимается со скоростями, превосходящими вторую космическую скорость для Луны. Расширяющееся в пустое пространство облако испарённого вещества подвержено процессу конденсации [94], причём конденсируется значительная часть этого вещества (десятки процентов). Частицы сконденсированного вещества поднимаются над лунной поверхностью со скоростями, превосходящими вторую космическую скорость для Луны, и, таким образом, покидают её, уходя в космическое пространство. Впрочем, такие потери скорее относятся к потерям вещества реголита, а не атмосферы.

Что касается источников, питающих лунную атмосферу, то выделяют пять основных категорий: термические источники, распыление (sputtering) при внешнем воздействии метеороидов, химические и метеоритные источники, а также внутренние выбросы. Эти вопросы подробно рассмотрены в статье [84]. Следует отметить, что, во-первых, разные виды источников важны для разных составляющих атмосферы, и, во-вторых, не существует единого источника, питающего атмосферу всеми её составляющими.

Термические источники, называемые иногда термодесорбцией, включают сублимацию вещества в самом верхнем (приповерхностном) слое лунного реголита, который находится под воздействием суточного цикла колебаний поверхностной температуры. Эти источники сосредоточены в основном вдоль лунного терминатора в утреннее время и, в меньшей степени, на дневной стороне Луны.

Источники распыления (sputtering sources) связаны с выбросами частиц из узлов кристаллической решётки в нескольких верхних монослоях поверхности Луны вследствие дискретного импульсного воздействия (например, ударов частиц солнечного ветра). Все типы распыления на поверхностях сложны и плохо поддаются точному анализу, что препятствует количественной оценке выхода вещества вследствие распыления на Луне.

К химическим источникам относится химическое распыление (chemical sputtering), которое происходит, когда химическая реакция на лунной поверхности (например, из-за падающих протонов солнечного ветра) имеет достаточно избыточной энергии для десорбции. Этот процесс, по-видимому, обеспечивает высокий выход распылённых летучих веществ.

Метеоритные источники связаны с ударами метеороидов, летящих со скоростью порядка десятков километров в секунду, о поверхность Луны. Ожидается, что среди нейтральных атомов атмосферы от данного источника преобладают летучие вещества, такие как щёлочи, сера, H_2O и другие составляющие, появляющиеся в основном в виде молекулярных фрагментов.

Внутренние выбросы могут быть связаны с вулканизмом (которого, впрочем, сейчас нет на Луне), с диффузией в коре Луны, утечками, вызванными сейсмическими воздействиями.

3.2. Процессы на поверхности реголита при воздействии внешних факторов

На поверхности Луны, как и на любом большом теле, находящемся в плазме, формируется равновесный электрический потенциал, чтобы предотвратить возрастание заряда из-за постоянно набегающего потока плазмы. Этот процесс приводит к образованию приповерхностной области ненейтральной плазмы, ограниченной двумя противоположно заряженными слоями. На освещённой Солнцем стороне Луны такая приповерхностная область ненейтральной плазмы, так называемый "двойной слой", формируется при взаимодействии набегающего потока плазмы солнечного ветра с поверхностью реголита. Поперечный размер двойного слоя имеет величину порядка дебаевского радиуса [95]. Параметры плазмы двойного слоя определяются внешним воздействием, например, концентрацией плазмы, величиной тепловых скоростей частиц плазмы, электрической проводимостью реголита и др., например, на освещённой Солнцем стороне Луны толщина такого слоя составляет порядка 1 м [5]. Формирование приповерхностной плазмы при воздействии солнечного излучения на лунный реголит происходит в результате фотоэффекта, набегающих потоков плазмы солнечного ветра (или хвоста магнитосферы Земли при его пересечении Луной), а также при эффектах обратного рассеяния протонов [96], вторичной электронной эмиссии и распыления. Для Луны и большинства других безатмосферных тел скорость фотоэмиссии при солнечном освещении намного больше, чем скорость поглощения реголитом электронов солнечного ветра, и поверхность реголита оказывается положительно заряженной.

Фотоэмиссия электронов, как правило, является основным процессом, приводящим к зарядке поверхностного слоя реголита на освещённой стороне Луны. Падающие фотоны с энергиями, превосходящими работу выхода материала лунной поверхности, вызывают фотоэмис-

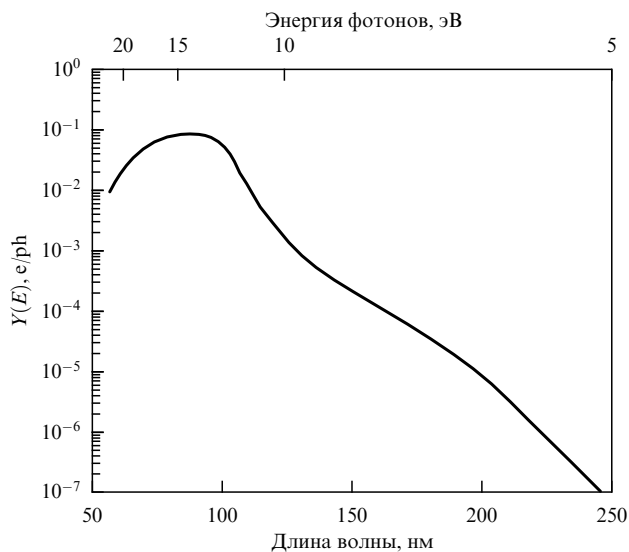


Рис. 7. Квантовый выход для двух образцов (14259.116 и 15021.98) лунного реголита [98].

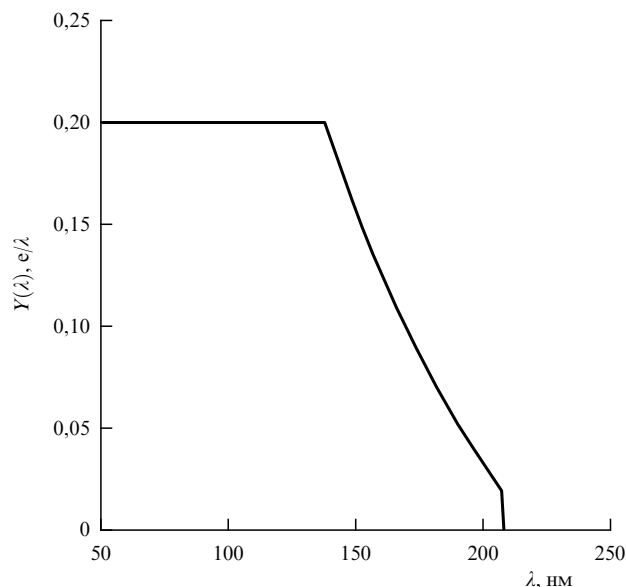


Рис. 8. Результаты модельного рассмотрения квантового выхода лунного реголита [99].

сию электронов. Работа выхода вещества лунного реголита и его квантовый выход, характеризующий число электронов, выбиваемых с поверхности одним фотоном, экспериментально исследовались в лабораторных условиях [97, 98]. Однако авторы отмечали, что эти исследования осуществлялись в инертной атмосфере, содержащей примеси, и её электрофизические свойства могли существенным образом повлиять на результаты. В работе [97] был исследован лишь один образец, который, по мнению авторов, не может служить достаточно репрезентативным с точки зрения формулировки окончательных выводов, а в работе [98] исследовали достаточно мелкие частицы, что могло повлиять на полученные значения квантового выхода. На рисунке 7 представлен дифференциальный поток фотоэлектронов, полученный в результате экспериментального исследования двух образцов лунного реголита, доставленных на Землю в миссиях Apollo [98]. На рисунке 8 представлены результаты модельного рассмотрения подобной зависимости, выполненные в [99].

Из представленных зависимостей видно, что они существенно образом различаются. Недостаточно точные данные величины квантового выхода фотоэлектронов лунного реголита и значительные вариации энергии фотонов при различных уровнях солнечной активности [100] при теоретическом анализе приводят к существенным неопределённостям оценок поверхностных потенциалов на освещённой стороне Луны. В связи с этим представляется важным определение указанных и других электрофизических характеристик лунного реголита непосредственно на Луне либо в лабораторных условиях в среде, максимально близкой к лунной.

В настоящее время общепринятым считается, что значение работы выхода лунного реголита находится в диапазоне 5–6 эВ [101]. В работах, в которых следует учитывать эффекты фотоэмиссии у поверхности Луны, как правило, используются эти значения работы выхода, а также зависимости значения квантового выхода от энергии фотонов, приведённые как в работе [98], так и в [99].

Так, например, результаты расчёта фотоэлектронного слоя над освещённой поверхностью реголита, выполненные в работе [97], составляют: 0,78 м для его толщины и $\sim 130 \text{ см}^{-3}$ для его концентрации. Тогда как при использовании данных [99] концентрация фотоэлектронов достигает $2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, а толщина слоя фотоэлектронов (определяемая условием, что концентрация электронов солнечного ветра в нём много меньше концентрации фотоэлектронов) достигает нескольких десятков метров [102]. Работа выхода и квантовый выход лунного реголита определяют функцию распределения фотоэлектронов по энергиям $\Phi_e(E_e)$, которая может быть получена стандартным образом на основе расчёта плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твёрдым телом под действием излучения:

$$\Phi_e(E_e) dE_e = 2 \cos \theta \sqrt{\frac{2m_e}{E_e}} \int_{E_e+W}^{\infty} Y(E_{ph}) F_{ph} d\rho dE_{ph}, \quad (1)$$

где E_e — энергия фотоэлектрона, E_{ph} — энергия фотона, W — работа выхода фотоэмиссии, θ — угол между местной нормалью и направлением на Солнце, m_e — масса электрона, $Y(E_{ph})$ — квантовый выход, зависящий от энергии фотонов, $F_{ph} dE_{ph}$ — число фотонов солнечного излучения с энергией E_{ph} в интервале dE_{ph} , пересекающих в единицу времени единичную площадку, перпендикулярную к направлению движения фотонов. Коэффициент 2 в правой части выражения (1) обусловлен тем, что в стационарном состоянии количества электронов, покидающих поверхность твёрдого тела и поглощаемых им, равны друг другу. При выводе формулы (1) пренебрегалось возможной анизотропией функции распределения фотоэлектронов в пространстве скоростей, обусловленной неровностями поверхности Луны. Вероятность того, что в результате поглощения фотона энергии E_{ph} испускается электрон с энергией E_e в интервале энергий dE_e , определяется выражением (2) [99]:

$$d\rho = \frac{6(E_m - E_e)}{E_m^3} E_e dE_e, \quad 0 \leq E_e \leq E_m = E_{ph} - W. \quad (2)$$

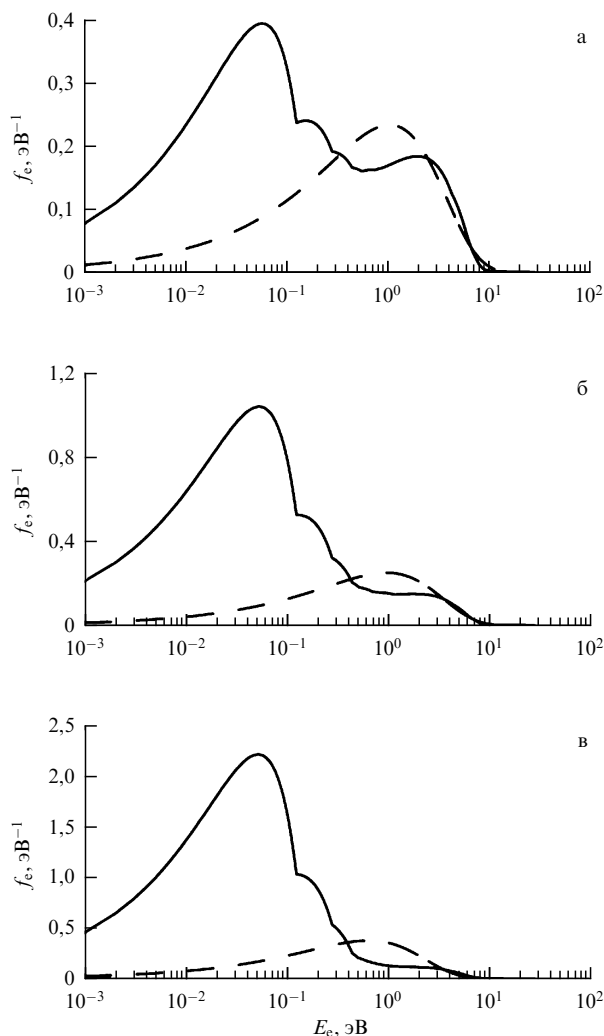


Рис. 9. Функции распределения фотоэлектронов $f_e(E_e)$ по энергиям (сплошные кривые) у освещённой части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (в). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ, квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [98]. Штриховыми кривыми показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображённые сплошными кривыми [103].

В работе [103] показано, что функция распределения фотоэлектронов значительно отличается от обычного максвелловского распределения. На рисунке 9 изображены функции распределения $f_e(E_e) = \Phi_e(E_e)/N_0$, где N_0 — концентрация фотоэлектронов у поверхности Луны, вычисленные для данных, соответствующих квантовому выходу [98] и различным уровням солнечной активности. Суммарная функция распределения $f_e(E_e)$ 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 Ly- α водорода (Лайман-альфа, 10,2 эВ) в спектре солнечного излучения и имеющих температуру порядка 1 эВ. Таким образом, наблюдаться должны фотоэлектроны как с энергиями порядка 1 эВ, так и с энергиями порядка 0,1 эВ.

Энергетические спектры испускаемых фотоэлектронов определяются произведением спектра падающих

фотонов и квантового выхода фотоэмиссии, как функции энергии фотонов (см. (1)). В зависимости от уровня солнечной активности потоки солнечного излучения, особенно в области энергий фотонов выше 10 эВ, могут резко меняться [100, 104]. Поэтому спектры фотоэлектронов на освещённой поверхности Луны (так же как и на других безатмосферных телах) крайне вариабельны и, как уже указывалось, очень чувствительны к квантовому выходу [100, 103]. Модельное распределение фотоэлектронов над освещённым Солнцем реголитом Луны рассматривалось в нескольких работах (см., например, [10, 12, 103, 105, 106]). В недавней работе [107] с использованием аналитического подхода [108] было показано, что в стационарном состоянии распределение фотоэлектронов по энергиям в значительной степени зависит от величины заряда и температуры лунной поверхности. И наоборот, распределение фотоэлектронов по энергиям имеет решающее значение для определения того, насколько велик потенциал поверхности на дневной стороне в солнечном ветре и в хвосте магнитосферы [107, 109].

3.2.1. Взаимодействие межпланетной плазмы с реголитом.

Наряду с фотоэмиссией определённый вклад в формирование потенциала поверхности могут вносить электронные и ионные токи, создаваемые набегающим потоком плазмы солнечного ветра или магнитосферной плазмы при пересечении Луной удалённого хвоста магнитосферы Земли. Обычно поток плазмы солнечного ветра на поверхность Луны составляет 10^8 ион $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 350–1200 эВ а.е.м.⁻¹ Некоторый вклад в формирование потенциала поверхности реголита, но значительно меньший (несколько процентов) при воздействии потоков межпланетной плазмы на поверхность реголита могут вносить обратное рассеяние ионов, распыление поверхности (sputtering), а также вторичная электронная эмиссия реголита.

При взаимодействии плазмы солнечного ветра с лунным реголитом основная масса ионов поглощается материалом реголита. Исследования взаимодействия солнечного ветра с Луной, выполненные космическими аппаратами Chandrayaan-1 (2008 г., Индия), Kaguya (2007 г., Япония), Chang'e-1 (2007 г., КНР), ARTEMIS (2007 г., США), показали [110], что значительная часть солнечных ионов (~ 10 –20 %) захватывают электроны и рассеиваются в пространстве в виде нейтральных атомов [96, 111, 112]. Небольшая часть ионов ($\sim 0,1$ –1,0 %) отражается от поверхности, сохраняя положительный заряд H^+ [113]. Что касается электронов солнечного ветра, то их коэффициент обратного рассеяния зависит от их скорости и материала поверхности и результирующее альбедо для таких частиц с энергиями ~ 100 эВ составляет ~ 10 –30 % [114].

Распыление (sputtering) частиц лунного реголита протонами солнечного ветра и более тяжёлыми ионами является процессом, приводящим к эрозии верхнего слоя реголита и, таким образом, являющимся одним из источников формирования атмосферы и экзосферы Луны [115, 116]. Этот вопрос кратко рассматривался выше при анализе источников лунной атмосферы. Здесь лишь напомним, что основными процессами, при которых происходит атомное распыление реголита, помимо ударных микрометеороидных процессов, являются атомное распыление материала реголита потоком солнечного ветра и фотонно-стимулированная десорбция [117–119].

При взаимодействии налетающих частиц межпланетной плазмы с материалом поверхности возможно возбуждение поверхностных атомов, сопровождаемое вторичной электронной эмиссией. Эффективность вторичной электронной эмиссии зависит от энергии налетающей частицы и материала поверхности. Частицы, падающие с более высокой энергией, могут проникать в его более глубокие слои и высвобождать большее количество электронов, которые, однако, покидают материал с меньшей вероятностью, чем вторичные электроны, появившиеся на меньшей глубине. Поэтому на функциях, характеризующих коэффициент вторичной электронной эмиссии, присутствуют пики, соответствующие энергиям первичных электронов, составляющим несколько сотен эВ для электронного удара и ~ 10 – 100 кэВ для протонного удара. Распределения вторичных электронов — максвелловские с характерными энергиями, составляющими несколько эВ [120]. Коэффициент вторичной электронной эмиссии в некоторых случаях может быть больше единицы [121].

Следует, тем не менее, ещё раз заметить, что в условиях освещённости средний заряд лунной поверхности будет определяться фотоэмиссией, а роль потоков плазмы и тем более вторичной электронной эмиссии будет незначительной [98].

3.2.2. Потенциал поверхности реголита. Зарядка поверхности Луны и формирование приповерхностного электрического поля у Луны осуществляется в результате комплексного воздействия внешних факторов на поверхность реголита, включая, в первую очередь, солнечное УФ-излучение, потоки электронов и ионов солнечного ветра (или магнитосферной плазмы при пересечении Луной геомагнитного хвоста), а также столкновения с поверхностью высокоскоростных микрометеороидов.

Электрический потенциал поверхности реголита под действием солнечного излучения устанавливается, когда сумма основных токов, влияющих на потенциал: фотоэмиссия электронов J_{pe} , потоки электронов плазмы J_e , ионов плазмы J_i и вторичных электронов J_{sec} (которые возникают в результате воздействия на поверхность реголита электронами набегающего потока плазмы, см. ниже) равна нулю. На освещённой стороне Луны концентрация фотоэлектронов обычно более чем на порядок превышает концентрацию плазмы солнечного ветра, поэтому потенциал поверхности на освещённой стороне положительный [122].

Определения потенциала поверхности проводились при выполнении программы NASA Apollo [123, 124]. В соответствии с данными измерений значения потенциала освещённой части поверхности реголита составляют величины порядка $+10$ В при зенитных углах Солнца до $\theta \sim 20^\circ$ – 45° (θ — угол между местной нормалью и направлением на Солнце). Учитывая, что поверхность реголита Луны близка к диэлектрику, приобретённый потенциал поверхности может сохраняться длительное время [125, 126]. При этом между заряженной поверхностью реголита и окружающей квазинейтральной плазмой возникает двойной (плазменный) слой с электрическим полем E . Характерная толщина такого слоя порядка длины Дебая, что для Луны составляет около 1 м [5]. С увеличением зенитного угла Солнца $\theta > 45^\circ$ потенциал поверхности быстро падает, у терминатора становится отрицательным и может достигать -100 В [123].

На ночной стороне Луны, как и любого безатмосферного непроводящего небесного тела, в условиях набегающего потока солнечного ветра создаётся область с крайне низкой концентрацией и малой скоростью плазмы. В этом случае аналогом двойного слоя считают область с поперечным размером порядка диаметра Луны [95]. Учитывая, что тепловые скорости электронов V_{Te} много больше тепловых скоростей положительных ионов V_{Ti} , в работе [8] аналитически было показано, что потенциал поверхности реголита на ночной стороне Луны должен быть отрицательным.

Измерения электрического потенциала поверхности лунного реголита, выполненные с лунного орбитального аппарата Lunar Prospector [127], показали, что на ночной стороне Луны потенциал реголита отрицательный и составляет около -200 В вблизи границы тени и около -100 В в центральной части лунной ночи [128]. Однако при пересечении Луной геомагнитного хвоста в области токового слоя, а также в солнечном ветре во время энергичных солнечных вспышек отрицательный потенциал реголита на ночной стороне Луны может достигать нескольких киловольт [129]. Структура двойного слоя на ночной стороне Луны зависит от направления потоков плазмы солнечного ветра относительно вектора межпланетного магнитного поля и электрической проводимости реголита, которая, хотя и крайне низка, но именно она определяет поверхностные токи, а следовательно, и усреднённый потенциал поверхности [8].

Особой зоной на поверхности безатмосферного тела с точки зрения электростатических процессов является зона терминатора, граница освещённой и затенённой поверхности реголита. Именно в районе терминатора несколькими американскими и советскими лунными посадочными аппаратами были зарегистрированы свечения (Lunar Horizon Glow, LHG) [1, 2, 130], вызванные отражением солнечного излучения от пылевых частиц, которые левитируют, как было предположено, в приповерхностных электрических полях (см., например, [126]). Исследованиями особенностей зоны терминатора с точки зрения приобретения электрического заряда поверхностью реголита и структуры двойного слоя было посвящено множество работ (см., например, [9, 32, 131–137]).

Как уже отмечалось, над освещённой частью Луны основными составляющими приповерхностной плазмы являются фотоэлектроны и положительно заряженные пылевые частицы, тогда как над тёмной частью основной вклад вносят электроны солнечного ветра. При этом концентрации электронов над освещённой частью всегда значительно выше, чем над тёмной стороной Луны. Последнее приводит к тому, что в районе терминатора существует область, представляющая собой аналог плазменного слоя, в которой могут возникать значительные электрические поля (~ 300 В м $^{-1}$) [138].

В возникновении значительных электрических полей в области терминатора важную роль также могут играть неоднородности поверхности [139–141]. В статье [9] было показано, что вблизи терминатора создаются условия для формирования сильных локальных электрических полей. Действительно, в силу того что в областях поверхности Луны, близких к терминатору, величина зенитного угла Солнца θ близка к 90° , на границе резких локальных неоднородностей поверхности реголита, например у кратеров или холмов различного масштаба,

существуют резкие локальные границы света и тени. Это приводит к формированию сильного локального градиента потенциала, величина которого зависит от крутизны склона локальной неоднородности поверхности реголита (т.е. от θ_z). Чрезвычайно малая проводимость лунного реголита поддерживает формирование сильной разности потенциалов в масштабах, намного меньших дебаевского радиуса [9]. Оценки, выполненные в данной работе, показывают, что создаваемые локальные электрические поля становятся достаточно сильными, чтобы приподнимать пылинки размером порядка 1 мм над поверхностью. Предложенный механизм эффективен только на тёмной стороне после заката достаточно близко к терминатору. Вдали от терминатора на тёмной стороне потоки заряженных частиц, попадающие на поверхность, оказываются настолько малы, что процесс подъёма пыли становится слишком слабым.

В заключение обсуждения проблем формирования потенциала поверхности лунного реголита следует подчеркнуть, что происходящие при этом физические процессы зависят от активности Солнца, условий освещения, влияния плазмы магнитосферы Земли, особенностей поверхности реголита. Несмотря на большое число работ, посвящённых перечисленным вопросам, требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, которые позволят уточнить значения потенциала и прояснить основные физические процессы, приводящие к его формированию. Причём наиболее критической областью, сохраняющей большое число нерешённых вопросов, является область лунного терминатора — граница света и тени.

3.3. Приповерхностная плазменно-пылевая среда

В настоящее время уже принято считать, что пыль над лунной поверхностью — составная часть плазменно-пылевой системы лунной экзосферы. Общая картина физических процессов при воздействии внешних факторов: электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли — на поверхность реголита и формирования плазменно-пылевой экзосферы Луны качественно выглядит следующим образом. На рисунке 10 представлена упрощённая схема воздействия внешних факторов на

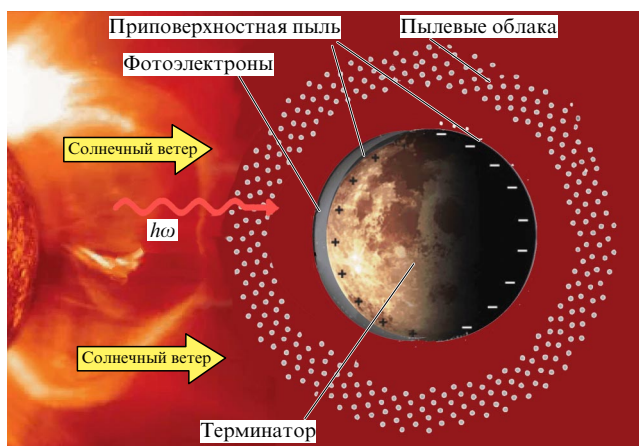


Рис. 10. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор, фотоэлектроны, приповерхностная пыль, пыль на больших высотах, фотоны солнечного излучения ($h\nu$), солнечный ветер.

поверхность реголита при формировании плазменно-пылевой среды.

На освещённой стороне Луны поверхность реголита за счёт фотоэффекта приобретает электрический заряд (вклад потока плазмы солнечного ветра обычно значительно меньше фотоэффекта). При этом формируется приповерхностный плазменный слой и электрическое поле E . Пылевые частицы, лежащие на поверхности реголита, для которых электростатическая сила F_c превышает силу адгезии Ван-дер-Ваальса F_{vdw} и силу гравитации F_g , отрываются от поверхности (lofting), становясь компонентами плазменно-пылевой экзосферы. Пылевые частицы, парящие над поверхностью Луны, при поглощении УФ-излучения также испускают фотоэлектроны. Приобретение заряда пылевыми частицами в результате фотоэффекта и поглощение ими фотоэлектронов происходит постоянно для всех частиц, лежащих на поверхности и парящих над поверхностью реголита. В тех случаях, когда Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, или при рассмотрении плазменно-пылевых процессов на неосвещённой стороне Луны, внешние воздействия на реголит меняются, изменяются и механизмы приобретения заряда микрочастиц поверхности реголита, но в любом случае над поверхностью реголита формируются плазменный слой и приповерхностное электрическое поле и, как результат, плазменно-пылевая экзосфера, характеристики которой определяются внешними воздействиями и электрическими свойствами реголита.

3.3.1. Наблюдения динамики лунной пыли. Одним из важных и не до конца изученных факторов внешнего воздействия на поверхность Луны является динамика микрочастиц лунного реголита, так называемая лунная пыль. Первые указания на присутствие 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 [2] (рис. 11). Эти изображения обнаруживают приповерхностное свечение над областью лунного терминатора с максимальной яркостью $0,26 \text{ кд см}^{-2}$, с характерными высотами $\sim 10\text{--}30 \text{ см}$. Авторы [2] заключили, что наблюдаемое свечение может происходить благодаря рассеянию солнечного света на взвешенных (левитирующих) над поверхностью заряженных пылевых частицах с размерами $a \sim 5 \text{ мкм}$ в электрическом поле, превосходящем несколько сотен В см^{-1} .

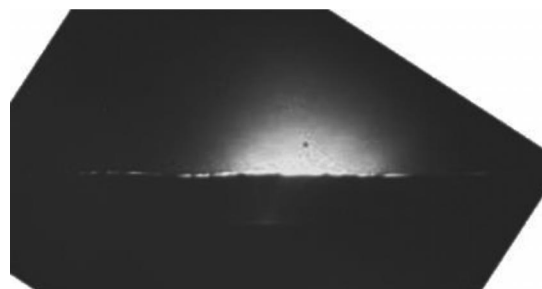


Рис. 11. Необработанное изображение LHG, полученное американским посадочным аппаратом Surveyor-6 (фрагмент фотографии из National Space Science Data Center) [5].

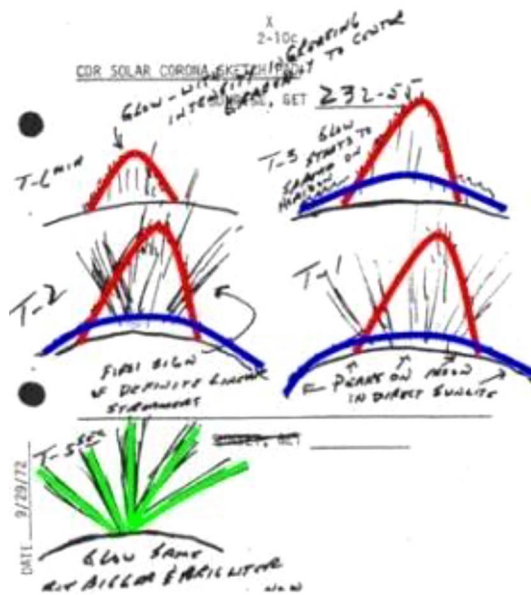


Рис. 12. Фрагмент зарисовки восхода на Луне, как его было видно с аппарата Apollo 17, находящегося на орбите вокруг Луны. Красным отмечено корональное и зодиакальное свечение; синим — лунные зори, обусловленные, возможно, пылью в лунной экзосфере; зелёным — возможные стримеры света (сумеречные лучи), формируемые затенённым и рассеянным светом [142].

Существование лунной пыли на больших высотах было доказано с помощью двухканального астрофотометра (2700 Å, 5400 Å), установленного на борту "Лунохода-2", зарегистрировавшего рассеяние света [130]. Оценки, проведённые по результатам этих измерений, указали на то, что облако пыли, рассеивающее солнечный свет, находилось на высоте 260 м над лунной поверхностью. Кроме того, астронавты пилотируемых аппаратов по программе Apollo во время этапа орбитальных полётов вокруг Луны проводили фотографирование и делали зарисовки визуальных наблюдений. Некоторые из таких зарисовок представлены на рис. 12 [142]. Позднее, в рамках миссии Clementine, также были получены изображения, свидетельствующие о существовании свечения в области лунного горизонта, которое, как полагали авторы [143], связано с подъёмом пыли за счёт электростатических процессов.

О присутствии пыли в лунной экзосфере также косвенно свидетельствуют данные советских экспедиций "Луна-19" и "Луна-22". Высокие концентрации электронов в лунной ионосфере, полученные радиозатменным методом [82] (см. раздел 2.1), могут быть обусловлены заряженными пылевыми частицами на высотах 5–10 км над Луной [85].

Первое непосредственное обнаружение пылевых частиц над поверхностью Луны относится к эксперименту LEAM (Lunar Ejecta and Meteorite), проведённому на поверхности Луны астронавтами миссии Apollo 17 [3]. На установке LEAM удалось получить данные о достаточно интенсивных потоках частиц со скоростями $v \sim 100–1000$ м с⁻¹, заряд которых, как правило, составлял $Q > 10^{-12}$ Кл ($> 10^7 e$).

Реальные свидетельства подъёма микрочастиц реголита над поверхностью Луны, полученные на ранних

этапах исследований Луны [5], привели к развитию теоретических и экспериментальных работ, направленных на объяснение плазменно-пылевых процессов в приповерхностной экзосфере Луны. Динамические модели, характеризующие поведение пылевых частиц над поверхностью Луны под действием электростатических сил, были развиты в теоретических и экспериментальных работах [10–14, 105, 144] и др.

3.3.2. Распределение пыли в приповерхностной экзосфере.

Теоретическая модель распределения пылевых частиц и электронов в приповерхностном слое освещённой части Луны была предложена в статьях [12, 73, 103]. Вычисления проводились в терминах угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, при этом использовалось значение работы выхода фотоэмиссии $W = W_R \approx 6$ эВ для разных оценок величины квантового выхода. Для описания плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещённой части Луны зарядка пылевых частиц над поверхностью Луны вычислялась с учётом влияния фотоэлектронов в двойном поверхностном слое, электронов и ионов солнечного ветра, а также при учёте фотоэффекта на пылевых частицах [73]. Не учитывалось влияние светового давления на динамику пылевых частиц, поскольку, как показывают оценки [73], основанные на сравнении электростатической силы, действующей на пылевою частицу у поверхности Луны, и силы светового давления, такое влияние сказывается лишь для частиц с размерами, заведомо не превышающими 1 нм.

Как было указано, в расчётах учитывались фотоэлектроны как от лунной поверхности, так и от поверхностей парящих над Луной пылевых частиц. Рассмотрение фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц требует самосогласованного описания, поскольку присутствие фотоэлектронов влияет на распределения пылевых частиц, в то время как распределения пылевых частиц определяет количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить её удаётся только численными методами. Для нахождения концентраций фотоэлектронов над поверхностью Луны производится решение системы уравнений, состоящей из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение потенциала у лунной поверхности и на бесконечном удалении от неё. Для нахождения функции распределения фотоэлектронов у лунной поверхности вычисляется количество электронов у поверхности Луны, выбиваемых фотонами в результате фотоэффекта, с использованием спектра излучения Солнца [145, 146], а также с учётом понижения работы выхода и повышения квантового выхода фотоэмиссии реголита в условиях монослоя водорода на пылевых частицах поверхности Луны [147]. В нулевом приближении, когда пренебрегается эффектами фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц, оказывается, что распределение (по скоростям) фотоэлектронов у поверхности Луны удаётся аппроксимировать максвелловским распределением, характеризуемым температурой фотоэлектронов $T_{e,ph}$ и их концентрацией N_0 . Поведение пылевых частиц в приповерхностном слое описывается уравнениями, учитывающими их динамику и за-

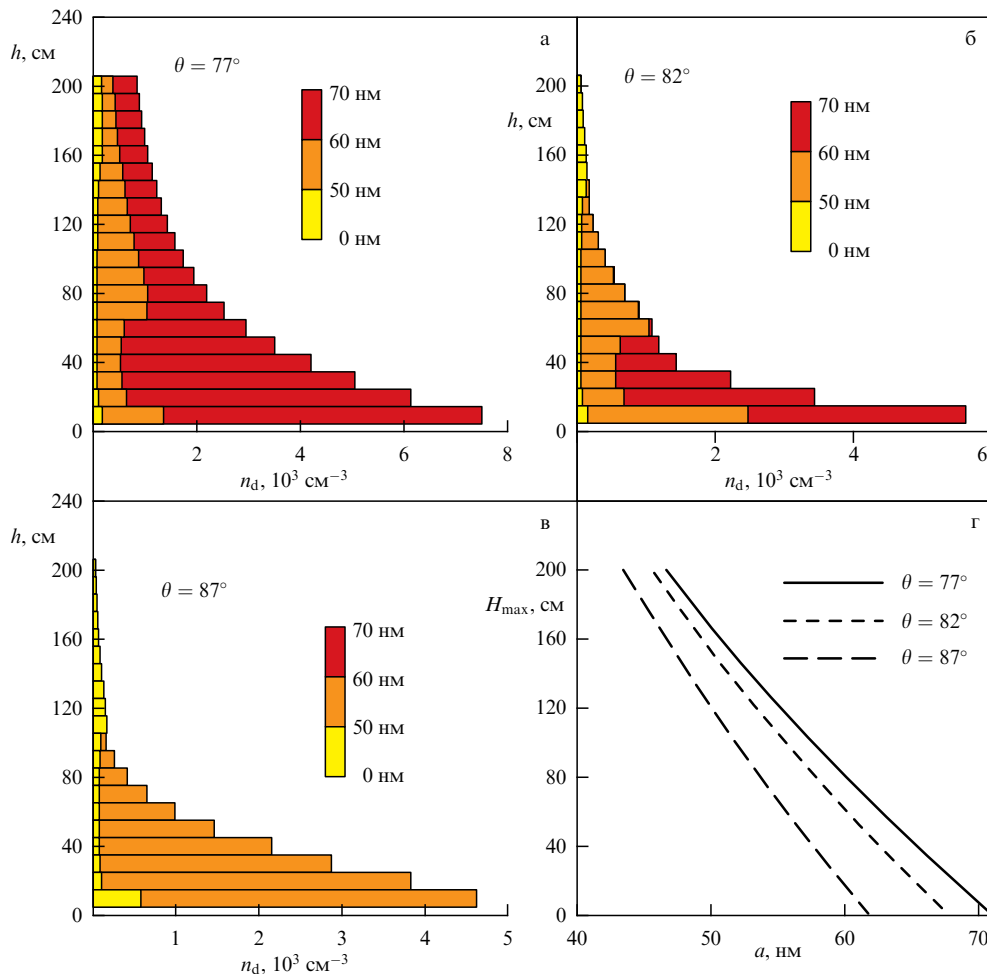


Рис. 13. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце $\theta = 77^\circ, 82^\circ, 87^\circ$ (а, б, в), а также максимально возможные высоты подъёма пылевых частиц (г) [73].

рядку:

$$m_d \frac{d^2h}{dt^2} = q_d E(h, \theta) - m_d g_M, \tag{3}$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \tag{4}$$

где h — высота над лунной поверхностью, m_d — масса пылевой частицы, q_d — её заряд, g_M — ускорение свободного падения у поверхности Луны, $I_e(q_d)$ 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 её взаимодействием с солнечным излучением, $I_{e,ph}(q_d)$ — ток фотоэлектронов на пылевую частицу (см., например, [73]). Знак "−" перед третьим слагаемым в правой части (4) означает, что фотоэлектроны, характеризуемые этим слагаемым, уходят с поверхности пылевой частицы, тогда как частицы плазмы, описываемые первым, вторым и четвёртым слагаемыми, наоборот, поглощаются на ней.

Расчёты в рамках системы уравнений (3), (4) позволяют, в частности, определить распределение пылевых частиц, парящих над Луной, по размерам. При этом вычисляется вероятность присутствия частицы на определённой высоте (пропорциональная времени присутствия частицы на данной высоте). Указанная вероят-

ность умножается на нормировочный множитель, который вычисляется таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание распределения (по размерам) поверхностной (соответствующей нулевой высоте) лунной пыли, приведённого в разделе 2.2 (см. рис. 4). В результате на рис. 13 представлено распределение пылевых частиц разных характерных размеров по высоте над поверхностью лунного реголита. На рисунке 13а – в приведены гистограммы, описывающие результаты расчётов концентраций пылевых частиц над поверхностью в полярной области Луны для углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равных $77^\circ, 82^\circ$ и 87° , в случае предположения гладкой (без холмов и впадин) поверхности Луны приблизительно соответствующих лунным широтам (отличие может составлять $\sim 1,5^\circ$). Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из графиков рис. 13а – в характеризует концентрацию частиц на соответствующих высотах h с размерами частиц в соответствующем интервале, указанном на каждом графике. Общая длина горизонтального участка на графике соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом графике. Рисунок 13г представляет результаты вычислений максимально возможных высот подъёма пылевых частиц различных размеров для различных значений угла θ . Немонотонность содержания достаточно мелких частиц

(с размерами, меньшими 60 нм) с высотой обусловлена тем, что поведение таких частиц динамическое (т.е. они не левитируют, а движутся по траекториям, близким к баллистическим), время нахождения частиц разных размеров на одинаковой высоте различно и, кроме того, каждый горизонтальный участок на рис. 13, соответствующий определённому диапазону размеров частиц, характеризует множество частиц. Уменьшение диапазонов размеров, определяющих горизонтальный участок, приводит к тому, что степень немонотонности содержания частиц на графике также уменьшается.

В целом, над освещённой частью Луны для значений угла θ , не очень близких к 90° (т.е. для не слишком малых значений $\cos \theta$) распределения пылевых частиц, поднимаящихся над Луной за счёт электростатических взаимодействий, подобны тем, которые изображены на рис. 13 и определяются фактором порядка $\cos \theta$. Основными носителями отрицательных зарядов в приповерхностном слое над освещённой стороной являются фотоэлектроны (n_{ph}) и в некоторых случаях — электроны солнечного ветра (n_{sw} , обычно их концентрации $n_{ph} \gg n_{sw}$), а носителями положительных зарядов — пылевые частицы и протоны солнечного ветра. Таким образом, характерные размер a и концентрация n_d заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещённой части Луны могут быть оценены соответственно характерными величинами порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} . Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе и фотоэлектронов, выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхностей парящих над Луной пылевых частиц). Над тёмной частью Луны при отсутствии фотоэлектронов оценка концентрации заряженной пыли с размерами порядка 100 нм даёт $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$.

Следует заметить, что в областях воздействия на Луну потоков плазмы солнечного ветра (либо магнитосферной плазмы при пересечении геомагнитного хвоста) могут развиваться плазменные неустойчивости, приводящие к возбуждению ленгмюровских и электромагнитных высокочастотных волн [102, 148]. В работе [149] было показано, что в окрестностях лунного терминатора возможно распространение пылевых звуковых волн. Практическая важность исследований волновых процессов в приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере Луны связана с тем, что все эти плазменные неустойчивости могут влиять, в частности, на результаты измерений параметров приповерхностной плазмы при натурных исследованиях.

3.3.3. Пылевые облака на больших высотах. Процессы формирования лунной приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы, рассмотренные выше в этом разделе, вызваны воздействием на реголит электромагнитного солнечного излучения и/или потоками межпланетной плазмы. Как уже указывалось, такие процессы происходят на поверхности реголита, на освещённой стороне Луны составляющего около метра, в приповерхностном плазменно-пылевом слое, толщина которого порядка дебаевского радиуса.

Иная картина возникает при воздействии на реголит высокоскоростными микрометеороидами кометного и астероидного происхождения. Скорость подобных частиц размером от 10 нм до 1 мм может достигать нескольких десятков км с^{-1} [22]. Как показано в разделе 2.1,

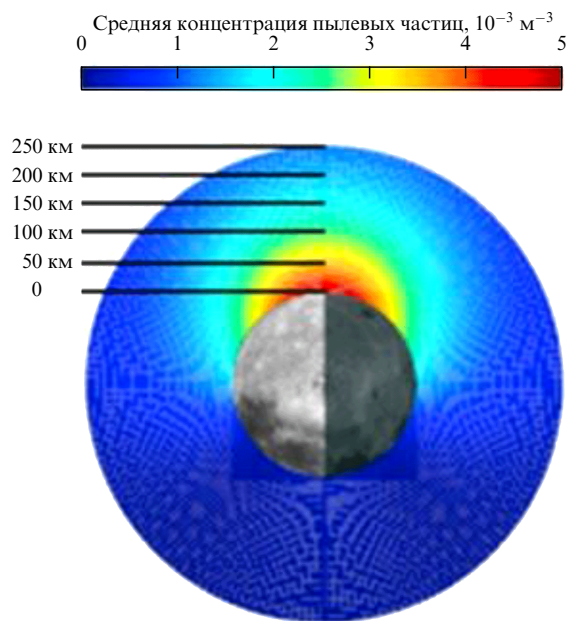


Рис. 14. Модельное среднегодовое распределение концентрации лунной пыли для частиц размером $> 0,3 \text{ мкм}$, полученное по результатам измерений прибором LDEX [150]. Солнце находится слева от изображения, а направление движения Луны в орбитальном движении — вверх.

это воздействие носит взрывной характер. Большинство частиц выброса (вторичных частиц) имеют начальную скорость ниже скорости убегания с Луны и при движении по баллистическим орбитам возвращаются на поверхность. Вторичные частицы микронного и субмикронного размера, которые выбрасываются со скоростью, близкой к скорости убегания, образуют сильно изменчивое, но постоянно присутствующее пылевое облако вокруг Луны. Такое пылевое облако на орбитах вокруг Луны было обнаружено прибором LDEX (Lunar Dust Explorer), установленным на орбитальном спутнике Луны LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) [25].

Прибор LDEX представлял собой детектор пыли с ударной ионизацией, который измерял как положительные, так и отрицательные заряды частиц плазменного облака, образующегося при попадании пылинки в мишень. Измеренные потоки пылевых частиц на орбитах вокруг Луны на высотах от 3 до 250 км указывают на то, что Луна окружена постоянно присутствующей, но очень изменчивой пылевой экзосферой. На основе измерений прибором LDEX [150] была получена модельная конфигурация пылевого облака над Луной (рис. 14).

3.4. Приповерхностные электрические и магнитные поля

В настоящее время принято считать, что наиболее вероятной причиной отрыва от поверхности и левитации пылевых частиц над освещённой частью безатмосферных тел является электростатический механизм [5]. Концепция такого процесса для Луны была предложена в работах [1, 151]. На пылевые частицы, находящиеся на поверхности реголита и получившие электрический заряд q , действуют кулоновская сила $F_c = qE_c$, гравитационная сила $F_g = mg_L$ (m — масса частицы, g_L —

ускорение свободного падения на Луне) и силы адгезии Ван-дер-Ваальса F_a . Если направленная вверх кулоновская сила превышает сумму сил, удерживающих пылинку на поверхности, $F_c > F_g + F_a$, частица отрывается от поверхности и сила Ван-дер-Ваальса исчезает. В результате при $F_c \gg F_g$ частица получает ускорение и отбрасывается от поверхности (lofting). В случае если существует баланс между действующими на частицу электростатической и гравитационной силами $F_c \approx F_g$, частица левитирует в приповерхностном электрическом поле E_c .

Однако возникают две существенные проблемы при использовании этого механизма. Первая заключается в том, чтобы понять, каким образом на пылинке, лежащей на поверхности, может накапливаться большой электрический заряд, необходимый для левитации в поле двойного электрического слоя. Вторая проблема связана с выяснением природы силы, которая способна отрывать пылинку от поверхности, преодолевая силу адгезии Ван-дер-Ваальса F_{vdw} и гравитационную силу F_g . Решение указанных проблем рассматривалось в нескольких работах, например, [6, 9, 152–155] и др.

При рассмотрении вопросов отрыва частиц пыли от непроводящей поверхности важным вопросом является учёт адгезивных сил Ван-дер-Ваальса F_{vdw} , которые сцепляют микрочастицы между собой или прикрепляют непосредственно к непроводящей поверхности. Для микронных и субмикронных частиц эти силы могут быть весьма значительными [152]. Для относительно больших пылевых частиц (с характерным размером $R \sim 1$ мм) силы адгезии $F_{vdw} \propto R$ становятся несущественными в сравнении с гравитационной силой $F_g \propto R^3$ [6]. Поэтому при обсуждении вопросов отрыва частиц рассмотрим вначале кратко методы оценки силы адгезии.

Величину сил адгезии обычно оценивают с помощью модели Хамакера [156]. Параметрами модели являются характерные размеры взаимодействующих частиц R_1 , R_2 , расстояние между их поверхностями D и введённый Хамакером параметр A . Этот параметр A имеет размерность энергии и зависит от свойств материалов микрочастиц, но не зависит от их формы. Выражения для оценки величины силы адгезии между двумя пылевыми частицами, используемые разными авторами, не сильно различаются [157]. Например, в статье [152] используется формула:

$$F_{vdw}(D) = \frac{A}{6D^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (5)$$

где параметр Хамакера $A \sim 10^{-19}$ Дж [156]. Расстояние между поверхностями пылевых частиц D — довольно неопределённая величина. Согласно [152], D может составлять от 0,3 нм до 100 нм, в зависимости от формы и шероховатости частиц пыли. Принимая характерный размер микрочастиц $R \sim 1$ мкм, можно оценить силу адгезии F_{vdw} как величину в интервале от 10^{-7} до 10^{-12} Н, что на несколько порядков превышает силу тяжести F_g , действующую на микронные частицы. Таким образом, чтобы оторвать от поверхности частицу с зарядом $q = ne$, даже если сила адгезии F_{vdw} имеет минимальное значение $\sim 10^{-12}$ Н, напряжённость электрического поля E над поверхностью должна удовлетворять условию

$$\frac{F}{e} = nE \geq 10^7 \text{ В м}^{-1}. \quad (6)$$

Если снова использовать значение $E \sim 10 \text{ В м}^{-1}$, то для отрыва от поверхности реголита микронная частица должна иметь заряд в миллионы e , что не представляется реальным. Поэтому следует предполагать, что либо непосредственно над поверхностью в момент отрыва пылинок существует чрезвычайно сильное локальное электрическое поле, либо отрыв происходит под действием неких сил иной природы (например, удары метеоритов, лунотрясения и др.).

3.4.1. Заряд уединённой пылинки и пылинки, лежащей на поверхности. Величины заряда, который приобретают лежащие на поверхности и парящие над ней пылинки, различаются на несколько порядков. Чтобы понять причину, достаточно рассмотреть два основных механизма приобретения заряда: столкновения с ионами и электронами солнечного ветра и фотоэффект. В обоих случаях процесс начинается с накопления заряда на исходно нейтральной поверхности пылинки. В плазме так происходит потому, что тепловые скорости электронов в десятки раз выше тепловых скоростей ионов (в плазме солнечного ветра это, в подавляющем большинстве случаев, протоны). Поскольку концентрации электронов и протонов примерно равны, электроны сталкиваются с пылинкой гораздо чаще, чем протоны. В результате на поверхности, абсорбирующей большинство падающих на неё частиц, накапливается отрицательный заряд. Если же на поверхность попадают фотоны, то в результате фотоэффекта на ней возникают положительно заряженные дырки.

Естественно, процесс накопления заряда не может продолжаться бесконечно. В случае воздействия плазмы на поверхность реголита чем больше величина отрицательного заряда лежащей на ней пылинки, тем сильнее пылинка будет отталкивать подлетающие электроны и притягивать протоны. При фотоэффекте чем больше величина положительного заряда, тем меньшая доля фотоэлектронов (только наиболее быстрые из них) смогут улететь навсегда, остальные вернуться обратно. Равновесная величина заряда пылинки достигается, когда среднее значение тока к её поверхности становится равным нулю.

Уединённой естественно называть такую пылинку, в окрестности которой поле любых других зарядов пренебрежимо мало. Тогда выравнивание величин текущих к её поверхности токов должно происходить только под действием её собственного поля, а его можно считать полем точечного заряда. Если же пылинка лежит на в среднем однородно заряженной плоскости, то поле над ней — сумма полей, создаваемых как ею самой, так и всеми соседними зарядами. При этом напряжённость такого поля постоянна в полупространстве над поверхностью и практически не зависит от собственного заряда пылинки. Следовательно, токи, текущие к поверхности уединённой пылинки, выравнивают поле, пропорциональное величине её собственного заряда, а токи, текущие к пылинке на поверхности, выравнивают поле, действующее в любой другой точке данной поверхности.

Уединённая пылинка легко могла бы приобрести (за счёт внешнего воздействия) заряд $q_0(r)$, достаточный для левитации (но не для отрыва от поверхности) [158]. Значение q_0 зависит от радиуса пылинки r и потенциала её поверхности $\phi_0 < 0$, при котором подавляющая часть летящих к пылинке электронов отбрасывается назад, так

что электронный и протонный токи становятся равными. Поэтому в равновесии $e\varphi_0$ порядка величины тепловой энергии электронов $k_B T_e$, а плотность заряда на поверхности уединённой пылинки обратно пропорциональна r :

$$\sigma(r) = \frac{q_0}{4\pi r^2} = \frac{\varepsilon_0 \varphi_0}{r} \approx -\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{er} \approx -1,5 \frac{10^{-10}}{r} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \approx \frac{10^9}{r} \frac{e}{\text{м}^2}. \quad (7)$$

Здесь положено $k_B T_e \approx 15$ эВ, и тогда пылинка радиусом 1 мкм может накопить порядка 1000 избыточных электронов.

Аналогичная ситуация возникает, если заряд на уединённой пылинке появляется за счёт фотоэмиссии. Теперь заряд пылинки положительный, и он копится до тех пор, пока не начнут возвращаться обратно почти все вылетевшие фотоэлектроны. Для этого $e\varphi_0$ должно быть порядка их кинетической энергии при взлёте с поверхности, так что мы снова приходим к формуле (7). В данном случае в неё вместо тепловой энергии надо подставить разность энергии кванта света и работы выхода. В результате изменится знак и несколько уменьшится величина σ , но в любом случае речь идёт о сотнях избыточных элементарных зарядов e на поверхности микронной пылинки.

Для уединённых частиц малого радиуса большая плотность поверхностного заряда необходима потому, что создаваемое ими электрическое поле практически исчезает уже на расстоянии h порядка десятка её радиусов r . Следовательно, именно в этом слое разность потенциалов должна равняться $\varphi_0 \propto E_0 h$, где E_0 — напряжённость поля над поверхностью $E_0 = \sigma/\varepsilon_0$. Именно поэтому плотность поверхностного заряда уединённой песчинки должна быстро расти с уменьшением её радиуса.

Совершенно иная ситуация возникает, когда пылинка лежит на плоской поверхности. В данном случае средний ток к поверхности оказывается равным нулю из-за торможения электронов внутри приповерхностного слоя, выше которого поле, равное $E_0 = \sigma_0 \varepsilon_0^{-1}$ над самой поверхностью, оказывается заэкранированным. В физике плазмы такой слой называется plasma sheath и его толщина вблизи Луны порядка радиуса экранирования Дебая $r_D \sim 1$ м [5]. При фотоэффекте plasma sheath (в данном случае это слой взлетающих и падающих обратно фотоэлектронов) экранирует положительный поверхностный заряд и поле выше указанного слоя равно нулю. В частности, если напряжённость поля над поверхностью около 10 В м^{-1} , а энергии фотоэлектронов не превышают 10 эВ, то толщина их слоя также около метра. Таким образом, в любом случае в равновесии плотность заряда на плоской поверхности σ_0 в r_D/r раз меньше, чем на поверхности пылинки радиуса r , и если такая пылинка лежит на поверхности, то на ней накопится только заряд $\pi \sigma_0 r^2$ (см. сравнение двух моделей для заряда пылинки в [152]). При этом действующая на неё кулоновская сила равна

$$F_C \approx 2\pi r^2 \varepsilon_0 E_0^2, \quad E_0 = \frac{\sigma_0}{2\varepsilon_0}. \quad (8)$$

Следовательно, при $E \approx 10 \text{ В м}^{-1}$ [123] кулоновская сила, действующая на пылинку с $d \approx 1$ мкм, должна составить около 10^{-21} Н, что в миллиард раз меньше нижней грани оценки для F_{vdw} . Более того, при средней плотности заряда на освещённой поверхности $\sigma_0 \approx \varepsilon_0 E \approx 10^{-10} \text{ Кл м}^{-2}$, что соответствует напряжённости поля $E \approx 10 \text{ В м}^{-1}$ над

освещённой поверхностью Луны, найти избыточный заряд хотя бы в $1e$ можно лишь на одной из тысячи пылинок диаметром 1 мкм.

Тем не менее пыль над поверхностью Луны и других безатмосферных тел левитирует. Именно такая пыль ответственна за неоднократно наблюдавшееся приповерхностное лунное свечение LHG. Наличие пыли над поверхностью было многократно подтверждено также приборами лунных станций (см. раздел 2.3) и экспериментами в лабораторных условиях (например, [6, 13, 152, 159, 160]). Следует полагать, что, скорее всего, пыль взлетает и левитирует под действием именно кулоновских сил, и пути разрешения этого парадокса наметились только в последнее время.

3.4.2. Флуктуации заряда микрочастицы на поверхности [155]. На освещённой поверхности Луны в результате фотоэффекта появляются заряды $+e$. Поверхность заряжается положительно, и на неё обратно возвращаются фотоэлектроны, принося (в случайное место на поверхности) отрицательный заряд $-e$. В целом, по данным измерений, поверхность заряжена положительно, и над ней существует электрическое поле с напряжённостью $E = 10 \text{ В м}^{-1}$ [123]. Плотность поверхностного заряда, создающего данное поле, равна $\sigma_0 \approx 2\varepsilon_0 E \approx 10^9 e \text{ м}^{-2} \approx 10^{-3} e \text{ мкм}^{-2}$, а плотность фототока с поверхности составляет $j_{\text{ph}} \approx 40 \text{ мкА м}^{-2} \approx 250 e \text{ мкм}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [122]. Таким образом, сумма *модулей* зарядов, падающих за 1 секунду на любую площадку на поверхности Луны, в сотни тысяч раз больше *средней* величины её заряда. В такой ситуации неизбежно возникают флуктуации, и амплитуда этих флуктуаций резко зависит от размера площадки, которую мы наблюдаем.

Если обозначить через $n_{\pm}(t)$ количество зарядов соответствующего знака, появившихся на участке площадью ΔS за время от t до $t + dt$, то плотность тока к этому участку

$$j(t) = j_+(t) + j_-(t), \quad j_{\pm}(t) = \pm \frac{en_{\pm}(t)}{\Delta S dt}. \quad (9)$$

Если определить среднее значение плотности тока как поделённую на K сумму её значений в разные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_K , $K \gg 1$, то в стационарном состоянии $\langle j_{\pm} \rangle = \pm j_0$, а $\langle j \rangle = 0$. Здесь j_0 — *среднее* значение модулей плотностей тока к поверхности положительных и отрицательных зарядов, которые равны между собой в стационарном состоянии. Однако эти токи по природе своей стохастичны, так что мгновенные их значения флуктуируют. Последнее означает, что в одни моменты на выбранный участок ΔS попадает больше положительных, а в другие — больше отрицательных зарядов. Поэтому мгновенная величина накапливающегося на этом участке заряда

$$q(t) = \int_0^t j(t') dt' \quad (10)$$

также флуктуирует, хотя её среднее значение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{q(t)}{t} = 0.$$

Поскольку в стационарном состоянии вероятности падения протонов и электронов на участок ΔS одинаковы, рассматриваемый процесс оказывается вполне аналогичным серии бросков монеты. Если выпадения

орла и решки обозначать соответственно ± 1 , то результатом серии из N бросков будет последовательность N чисел типа $+1, +1, -1, \dots, -1$. Скорее всего, в любой серии из N бросков орёл и решка выпадут неодинаковое число раз, т.е. сумма всех ± 1 будет неким положительным или отрицательным числом $\pm v$ (ср. с (10)). Если провести много серий по N бросков и усреднить их результаты, то мы получим $\langle v \rangle = 0$, но если усреднять не v , а v^2 , то мы получим

$$\langle v^2 \rangle = \langle (+1, -1, \dots, -1)^2 \rangle \equiv N. \quad (11)$$

Поскольку средний квадрат числа избыточных выпадений орла или решки равен N , для амплитуды флуктуаций накопленного заряда $\delta q = ve$, и, поскольку $N = 2e^{-1} j_0 \Delta S t$, мы получаем

$$\langle \delta q \rangle \approx \sqrt{2e j_0 \Delta S t}. \quad (12)$$

В такой ситуации в микромасштабе поверхность должна выглядеть как набор разных по величине и хаотически разбросанных "зарядовых пятен", имеющих различный положительный или отрицательный заряд. С учётом того что для создания заметного поля над поверхностью на ней должен присутствовать некоторый средний по поверхности в макроскопическом смысле заряд, количество или средний заряд пятен одного знака (на освещённой лунной поверхности — положительного) должно превалировать, так что средняя по всей поверхности плотность заряда $\sigma_{\pm} \neq 0$.

Картина распределения зарядовых пятен на поверхности не является статической, флуктуируют их очертания, размеры, величины и знаки заряда. В каждый момент t приращение $\delta x(t)$ любой флуктуирующей величины $x(t)$ определяется конкуренцией двух вкладов: стохастических процессов (броуновского блуждания) и однонаправленного процесса, стремящегося подавить любое отклонение величины x от её стационарного среднего значения x_0 (затухание). Если падение заряженных частиц и квантов света на поверхность происходит вполне случайно, то согласно (12) амплитуда флуктуаций заряда в пятнах должна со временем нарастать пропорционально \sqrt{t} . Поскольку будет нарастать амплитуда флуктуаций плотности заряда на поверхности возникшего пятна, с ней будет нарастать и амплитуда флуктуаций напряжённости поля над ним

$$\langle \delta \sigma \rangle \approx \langle \delta q \rangle \Delta S^{-1} \propto \Delta S^{-1/2}, \quad \langle \delta E \rangle \approx (1/2) \epsilon_0^{-1} \langle \delta \sigma \rangle, \quad (13)$$

так что обе эти амплитуды обратно пропорциональны линейному размеру пятна.

Однако, несомненно, амплитуда флуктуаций не может со временем нарастать бесконечно, поскольку появившийся на площадке ΔS избыточный заряд δq приведёт к тому, что падение на неё новых ионов и электронов уже не будет случайным. Ионы с зарядом того же знака, что и δq , будут теперь отталкиваться от ΔS и падать на неё реже, а ионы с зарядом противоположного знака — чаще. Именно таким образом работает в данном случае механизм неуклонного подавления возникшей флуктуации, определяющий её время жизни τ . Сразу после возникновения амплитуда флуктуации растёт пропорционально \sqrt{t} , а процессы затухания при малых амплитудах не слишком существенны. Однако с ростом t скорость нарастания амплитуды, пропорциональная

$t^{-1/2}$, падает, процессы затухания выходят на первый план и, просуществовав в течение промежутка времени порядка τ , флуктуация исчезает. Основываясь на этих соображениях, можно ожидать, что в равновесии амплитуда зарядовых флуктуаций имеет примерно ту величину, до которой $\langle \delta q \rangle$ (12) вырастает за время τ ,

$$\langle \delta q \rangle_{\text{eq}} \approx \sqrt{2e j_0 \Delta S \tau}. \quad (14)$$

В общем такой вывод не противоречит результатам, получаемым при решении описывающих стохастические процессы математических уравнений, что вполне естественно. Мы не будем обсуждать здесь различные варианты подобных уравнений, которые достаточно хорошо известны и подробно описаны в учебниках. Однако мы кратко обсудим специфическую проблему, возникающую при попытке применить эти уравнения для описания зарядовых флуктуаций на плоской поверхности.

Как ясно из (14), при исследовании флуктуаций поверхностного заряда в центре внимания оказывается проблема вычисления τ . При этом, поскольку скорость затухания флуктуации определяется полем над ней, при вычислении τ на первый план выходит проблема вычисления значений потенциала или напряжённости поля над поверхностью, на которой происходят зарядовые флуктуации. Как уже упоминалось выше при обсуждении заряда уединённой частицы, только поле её собственного заряда регулирует текущий к её поверхности ток, т.е. скорость изменения данного заряда со временем. Поскольку поле над уединённой частицей прямо пропорционально её заряду, при описании флуктуаций заряда в такой системе мы должны решать стандартные уравнения с одной флуктуирующей переменной.

В случае флуктуаций зарядового пятна на плоскости скорость изменения его заряда также регулируется полем над ним. Однако теперь это поле создаётся не только собственным зарядом пятна. Оно является суммой полей, создаваемых всеми зарядами, расположенными на данной плоскости,

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}) = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \hat{e}_z + \int_S \frac{\sigma(\mathbf{r}) - \sigma_0}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3} (\mathbf{R} - \mathbf{r}) dS, \quad (15)$$

$$\mathbf{R} = (x, y, z), \quad \mathbf{r} = (x, y),$$

где σ_0 — среднее значение плотности заряда на плоскости, а \hat{e}_z — единичный вектор вдоль перпендикулярной плоскости оси z . Таким образом, скорость изменения любого зарядового пятна зависит от всех зарядовых пятен на плоскости, т.е. мы имеем дело с системой, состоящей из бесконечно большого числа флуктуирующих и взаимодействующих друг с другом элементов.

В действительности проблема ещё сложнее, поскольку кроме поля зарядовых пятен нужно учесть поле объёмных зарядов (plasma sheath и/или слой фотоэлектронов) над поверхностью. Однако, пренебрегая вкладом объёмного заряда, можно найти потенциал φ из уравнения Пуассона

$$\Delta \varphi(\mathbf{R}) = -\epsilon_0^{-1} [\sigma_0 + \delta\sigma(\mathbf{r})] \delta(z), \quad \delta\sigma(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) - \sigma_0, \quad (16)$$

которое может быть решено в аналитическом виде [161]. Здесь $\delta(z)$ — дельта-функция и, разложив неоднородную добавку к плотности поверхностного заряда в ряд

$\delta\sigma(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{k}} \delta\sigma_{\mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$, для каждой фурье-компоненты можно получить *точное* решение этого уравнения:

$$\delta\varphi(\mathbf{R}) = \delta\varphi_{\mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r} - k|z|), \quad \delta\varphi_{\mathbf{k}} = \frac{\delta\sigma_{\mathbf{k}}}{2\epsilon_0 k}. \quad (17)$$

В результате задача о взаимодействующих друг с другом и флуктуирующих локальных зарядовых пятнах сводится к *точно* решаемой задаче об ансамбле флуктуирующих независимо друг от друга зарядовых волн.

Из (17) видно, что, когда на поверхности флуктуируют зарядовые пятна, над ней возникает тонкий слой пульсирующего электрического поля. Его можно представить себе как суперпозицию флуктуирующих независимо друг от друга полей, каждое из которых имеет периодическую структуру со своим волновым вектором \mathbf{k} , параллельным плоскости xy , но в то же время очень резко — пропорционально $\exp(-k|z|)$ — ослабевает по мере удаления от неё. Следовательно, чем меньше длина волны $\lambda = 2\pi k^{-1}$ возникшей периодической структуры, тем быстрее её поле затухает при удалении от поверхности. Кроме того, из (16) следует, что чем меньше λ , тем слабее поле, создаваемое этой волной зарядовой плотности, а потому больше время её релаксации, т.е. чем меньше размер зарядового пятна, тем больше его время жизни. Следует подчеркнуть, что в работе [161] такой вывод получен для случая, когда плотность тока к зарядовому пятну пропорциональна потенциалу на его поверхности. По-видимому, другие факторы следует также учитывать (например, обычную электропроводность $j \propto E$) при вычислении тока, что может сделать связь между размером зарядового пятна и его временем жизни более сложной.

В заключение отметим, что в результате флуктуаций заряда микрочастицы, лежащей на поверхности реголита, напряжённость E локальных электрических полей непосредственно над поверхностью зарядовых пятен размером порядка микрона может составлять $\sim 10^6 - 10^7 \text{ В м}^{-1}$ [155, 161]. К тому же выводу пришли и авторы [162], проводившие эксперименты с квантовыми точками, встроенными в поверхность, на которой происходили зарядовые флуктуации. При подстановке подобных значений E в (8) становится ясно, что кулоновская сила, действующая на пылинку, лежащую вблизи центра такого пятна, может легко превзойти, по крайней мере, нижнюю грань оценочных значений сил адгезии.

3.4.3. Другие механизмы возникновения сильных локальных полей. Иной подход к объяснению возникновения сильного электрического поля у поверхности Луны был рассмотрен в работе [9]. В данной статье была предложена модель возникновения локального электрического поля вблизи естественных неоднородностей поверхности Луны (кратеры, камни и т.п.). Модель разработана для тех случаев, когда зенитный угол Солнца близок к 90° , что наиболее характерно для районов терминатора и полярных областей. Было показано, что если характерный размер неровности реголита много меньше локального дебаевского радиуса, то, при условии низкой проводимости реголита, под влиянием внешних условий может возникать достаточно сильное электрическое поле на границе света и тени, и это поле может обеспечить отрыв пылинок от поверхности и их левитацию.

Более изощрённая модель, объясняющая, как может происходить резкое увеличение зарядов пылевых частиц,

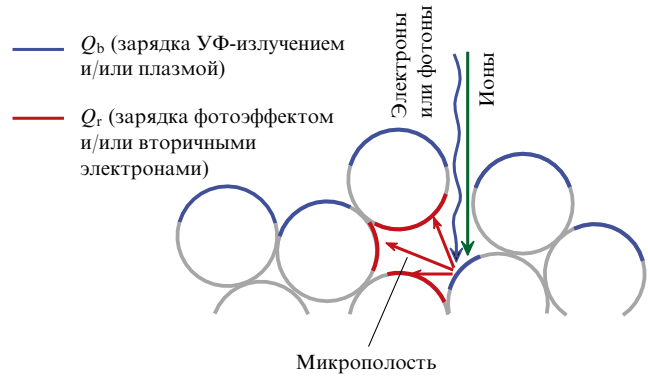


Рис. 15. Зарядовая модель "патч" [154]. Пылевые частицы (серые сферы) формируют микрополость (в центре). Фотоны и/или электроны и ионы попадают на поверхности (отмеченные голубым цветом) пылевых частиц, заряжают их, при этом эмитируются фотоэлектроны или вторичные электроны. Часть испускаемых электронов повторно поглощаются на пылинках внутри полости (красные участки поверхности пылевых частиц), и они заряжаются отрицательно.

была предложена в работе [154], где отмечалось, что кванты света или быстрые частицы могут проникать сквозь зазоры между пылевыми частицами самого верхнего слоя реголита в естественные подповерхностные каверны и выбивать электроны из нижележащего слоя частиц. Выбитые электроны могут поглощаться пылевыми частицами верхнего слоя такой каверны. Схема предложенного механизма, названная авторами "patched charge model", представлена на рис. 15. На данном рисунке пылевые частицы, обозначенные серыми сферами, формируют микрополость (в центре рисунка). Фотоны и/или электроны и ионы попадают на поверхности (отмеченные голубым цветом) пылевых частиц, заряжают их, при этом эмитируются фотоэлектроны или вторичные электроны. Часть испускаемых электронов повторно поглощаются на пылинках внутри полости (красные участки поверхности пылевых частиц), и они заряжаются отрицательно.

По мнению авторов, когда отрицательные заряды пылинок на "потолке" каверны станут достаточно большими, кулоновская сила отталкивания отрицательно заряженных частиц заставит их отрываться от поверхности и взлетать вверх. Следует отметить, что эта модель в настоящее время достаточно широко используется в работах некоторых исследователей.

3.4.4. Зависимость условий отрыва частиц от температуры.

Рассматривая проблему отрыва микрочастиц от поверхности, следует иметь в виду, что если величина сил сцепления составляет несколько пиконьютонов, то вероятность отрыва должна сильно зависеть от температуры. Действительно, силы Ван-дер-Ваальса довольно быстро убывают с расстоянием D между частицами $F_{vdw} \sim D^{-2}$ (см. формулу (5)). Поэтому работа, необходимая для разделения частиц, исходно находящихся на расстоянии D ,

$$W = F(D) D \int_1^\infty \frac{dx}{x^2} = F(D) D \quad (18)$$

оказывается не слишком большой. Если значения $A \sim 10^{-19} \text{ Дж}$, $D \sim 0,3 \text{ нм}$ [152], то при характерных раз-

мерах частиц $R_1 \approx R_2 \approx 0,5$ мкм сила адгезии $F_{vdw} \sim 5 \times 10^4$ пН и $W \approx 1,5 \times 10^{-17}$ Дж, что соответствует тепловой энергии $k_B T$ при $T \approx 10^6$ К. Если же $D \approx 100$ нм, то $F \approx 0,4$ пН, $W \approx 4 \times 10^{-20}$ Дж и $T = W/k_B \approx 3000$ К. Данный случай соответствует стандартной оценке энергии дипольных связей $W \approx 10-20$ кДж моль $^{-1}$ [163]. Это означает, что при $T \approx 400$ К, т.е. близкой к температуре освещённой Солнцем поверхности Луны [76], примерно три из каждых 10000 лежащих на поверхности пылинок за счёт тепловых флуктуаций будут иметь достаточную энергию для взлёта. Более того, в таких условиях исключительно за счёт подобных флуктуаций мельчайшие пылинки с $d \sim 10$ нм могут левитировать на высоте около 1 м [164].

Кроме того, при анализе разрушительного воздействия лунной пыли следует учитывать и вращение пылинок, приобретающих угловой момент при отрыве от поверхности реголита. В силу принципа равного распределения энергии по степеням свободы сфероид массы m должен вращаться с экваториальной скоростью $v \approx \sqrt{5k_B T/2m}$. Для микронной частицы (массой $\sim 10^{-15}$ кг) данная скорость порядка миллиметров в секунду, а для пылинки диаметром 10 нм (массой $\sim 10^{-21}$ кг) такая скорость составляет уже несколько метров в секунду. Как отмечается в работе [164], это означает, что левитирующие и вращающиеся над поверхностью реголита пылинки с характерным размером десятки нанометров могут совершать десятки, а то и сотни миллионов оборотов в секунду. Такое свойство левитирующих пылинок может качественно менять степень их воздействия на возникающее препятствие (данный вопрос будет обсуждаться в разделе 4).

3.4.5. Приповерхностные магнитные поля. Измерения с помощью магнитометров в местах посадки аппаратов Apollo (на видимой стороне Луны) показали, что напряжённость магнитного поля у поверхности находится в диапазоне $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ Гс [165]. Измерения и глобальное картирование магнитных полей с орбит спутников Луны аппаратами Lunar Prospector [166] и Kaguya [167] обнаружили, что на Луне существуют области локальной намагниченности, называемые магнитными аномалиями. Напряжённость магнитного поля в зонах магнитных аномалий может составлять до 100 нТл (10^{-3} Гс) [166]. В работе [79] сделано предположение, что магнитные аномалии могут создавать мини-магнитосферы, в результате чего над областями магнитных аномалий потоки солнечного ветра отклоняются. По наблюдениям Lunar Prospector [168] и Chandrayaan-1 [169, 170], локальные магнитные аномалии были ассоциированы с мини-магнитосферами. Мини-магнитосферы обладают чертами, характерными для нормальных планетарных магнитосфер, а именно бесстолкновительной ударной волной [171]. Электрическое поле, связанное с мелкомасштабной (порядка нескольких сотен километров) бесстолкновительной ударной волной, отвечает за отклонение потока солнечного ветра вокруг мини-магнитосферы, и их форма должна определяться формой бесстолкновительной ударной волны, классического явления в физике плазмы, широко распространённого во многих космических и астрофизических процессах, когда, например, поток плазмы солнечного ветра взаимодействует с намагниченной планетой [172].

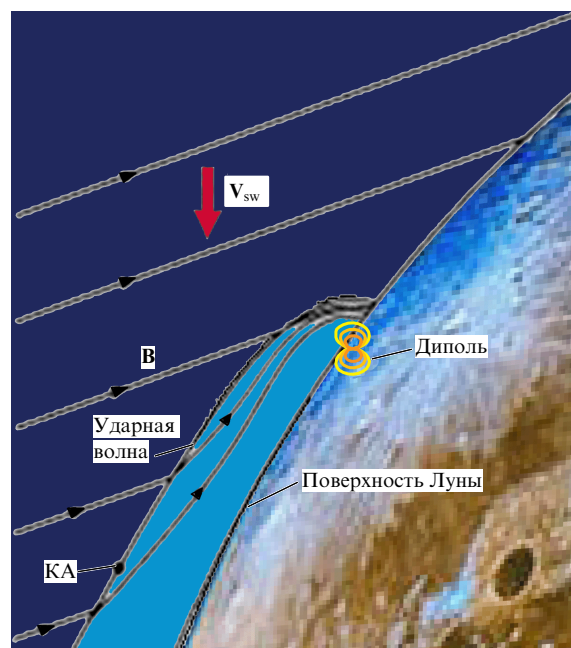


Рис. 16. Схема взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем лунной коры. Это магнитное поле представлено диполем, который находится в фокусе поверхности гиперболической ударной волны, пересекающей космический аппарат (КА) Lunar Prospector. Также изображены силовые линии межпланетного магнитного поля B и вектор скорости солнечного ветра V_{sw} [79].

Численное моделирование взаимодействия частиц солнечного ветра с намагниченными областями на поверхности Луны показывает, что заглублённый в 100 км под поверхностью диполь с напряжённостью поля 50 нТл на поверхности и 10 нТл на высоте 100 км над поверхностью отклонял поток солнечного ветра и вызывал формирование головной ударной волны и магнитопаузы [173]. Однако при моделировании головная ударная волна и магнитопауза недостаточно чётко разделяются из-за мелкомасштабного размера мини-магнитосфер. Пространственный размер магнитных аномалий (порядка 100 км) сравним с ионным гирорадиусом солнечного ветра (обычно 30–150 км) и, как отмечено в работе [169], при этом условии должны быть важны кинетические эффекты. На рисунке 16 изображена схема взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем лунной коры при наблюдениях лунным орбитальным аппаратом Lunar Prospector [79].

Важным следствием образования мини-магнитосферы является то, что, экранируя поверхность Луны от солнечного ветра, подобная магнитная структура защищает поверхность реголита от воздействия набегающего потока ионов, вследствие чего в области мини-магнитосферы условия воздействия солнечного ветра на реголит меняются. Видимо, с этим фактом связаны так называемые лунные "вихри" (lunar swirls), которые во многих случаях ассоциируются с лунными магнитными аномалиями и областями высокого альбедо на лунной поверхности. Анализ спектров, полученных с помощью УФ- и ИК-камер, установленных на лунном орбитальном аппарате Clementine, показал, что на исследуемых участках поверхности Луны, где наблюдались лунные "вихри", внешнее воздействие вызвало меньшую эрозию реголита, в то время как непосредственно прилегающие к

ним области испытали усиленное выветривание [174, 175]. Микрочастицы лунного реголита могут переноситься вдоль поверхности слабыми электрическими флуктуациями, создаваемыми взаимодействием солнечного ветра с магнитными аномалиями, на расстояния, сравнимые с масштабами длины возникающего "вихря" [176].

Примерно четверть своей орбиты Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, где типичные магнитные поля характеризуются значениями магнитной индукции порядка $1-10$ нТл [177]. Луна движется по орбите со скоростью около 1 км с^{-1} . Таким образом, с учётом того что пылевая плазма у Луны "привязана" к её поверхности, возникает относительная скорость движения заряженных пылевых частиц по отношению к силовым линиям магнитного поля геомагнитного хвоста, имеющая порядок 1 км с^{-1} . Следовательно, несмотря даже на небольшие значения индукции магнитного поля у Луны, возможно появление довольно ощутимой (из-за достаточно большой величины относительной скорости) магнитной части силы Лоренца, действующей на пылевые частицы. Схематически движение Луны в хвосте земной магнитосферы, вектор индукции магнитного поля \mathbf{B} , скорость пылевой частицы \mathbf{V}_d , а также магнитная часть силы Лоренца F_L показаны на рис. 17.

Благодаря действию этих магнитных полей при прохождении Луны в хвосте магнитосферы Земли, возможен меридиональный (от -90° до 90°) транспорт заряженных пылевых частиц над лунной поверхностью на большие расстояния [178]. Перенос пылевых частиц из области широт, прилегающих к лунным полюсам, к экватору Луны за счёт нескомпенсированной магнитной части силы Лоренца является принципиально важным, качественно новым эффектом, отсутствующим вне области магнитосферного хвоста. Отметим, что 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 её заряд, зависит от угла между местной нормалью к поверхности и направлением на Солнце. Кроме того, на заряд частицы влияет и высота, на которой находится пылевая частица. В процессе пере-

носа данная высота может изменяться. Магнитная часть силы Лоренца, действующая на пылевые частицы, находящиеся в районах магнитных аномалий, либо меньше, либо сопоставима с аналогичной силой, вычисленной для магнитных полей хвоста магнитосферы Земли на орбите Луны. Однако из-за существенной локализации областей магнитных аномалий их влияние на динамику заряженных пылевых частиц над Луной не приводит к подобным качественным эффектам.

4. "Токсичность" лунной пыли

Из всех известных особенностей лунной среды самой неожиданной и, по-видимому, самой загадочной является лунная пыль. Несмотря на то что выполнение американской пилотируемой программы Apollo в период с 1969 по 1972 гг. было оценено как "поразительно успешное" [179], американские астронавты столкнулись с непредвиденной и очень неприятной проблемой — агрессивным воздействием лунной пыли. Экипажи каждой из шести экспедиций Apollo на поверхность Луны отмечали непреодолимые проблемы, вызванные воздействием лунной пыли. При подготовке каждой последующей экспедиции Apollo предпринимались попытки учесть воздействие пыли, однако решения для минимизации её влияния так и не было найдено. Наиболее ёмко свою реакцию на воздействие лунной пыли выразил командир последней экспедиции Apollo 17 Юджин Сернан (Eugene Cernan). В своём отчёте он написал: "Я думаю, что пыль, вероятно, является одним из основных ограничителей планируемой работы на Луне. Я думаю, что мы можем преодолеть другие физиологические, или физические, или механические проблемы, кроме пыли" [17].

4.1. Воздействие естественной лунной среды

Ещё на ранних этапах исследований Луны на её поверхности были развёрнуты несколько отражательных систем для лазерной локации. Лазерные отражатели были установлены на "Луноходе-2" [130] и американскими астронавтами в местах прилунения посадочных модулей при выполнении программы Apollo [180]. Первые несколько месяцев наблюдений сигнал от лазерного отражателя "Лунохода-2" был на 25 % сильнее, чем от отражателя, установленного на Apollo. Однако почти через 40 лет работы этих систем на поверхности Луны величина сигнала от отражателя "Лунохода-2" стала на порядок ниже, чем у Apollo [180]. Данный эффект может быть связан с тем, что отражающие поверхности "Лунохода-2" были более открытыми для внешнего воздействия, чем отражатели Apollo. Такие конструктивные особенности могут уменьшать их отражательную способность из-за осаждения левитирующей лунной пыли, воздействия частиц, связанных с микрометеороидной бомбардировкой. Во всяком случае, анализ работы этих систем в течение нескольких десятилетий показал, что в естественных, не возмущённых антропогенными факторами, условиях оптические системы достаточно успешно выполняли свои функции, однако постепенная деградация оптики фиксировалась на временном масштабе порядка десятилетий [180].

Другим важным источником информации о влиянии лунной приповерхностной среды на системы посадочных аппаратов был анализ длительного нахождения автоматического посадочного аппарата Surveyor-3 на по-

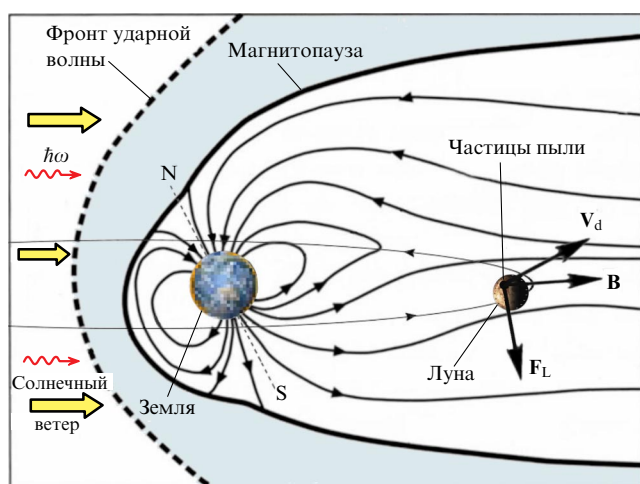


Рис. 17. Схематическое изображение движения Луны в хвосте магнитосферы Земли. Лунная орбита изображена тонкой линией; стрелки на лунной орбите показывают направление движения Луны. Также изображены солнечный ветер и фотоны солнечного излучения ($h\omega$) [178].

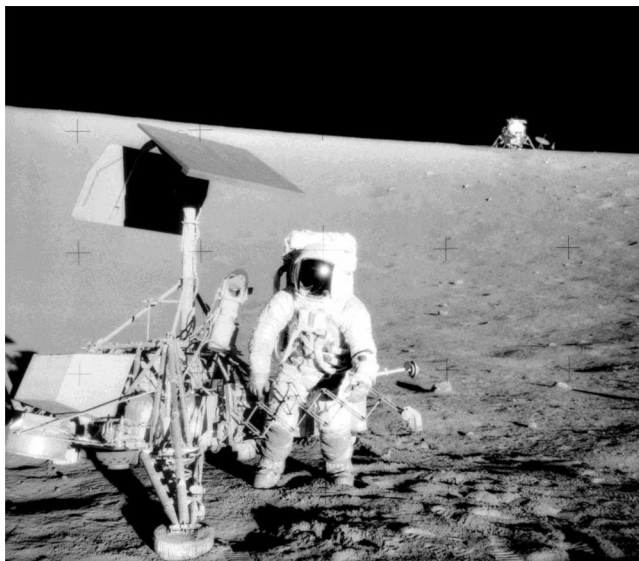


Рис. 18. Командир миссии Apollo 12 астронавт Чарлз Конрад (Charles Conrad), у автоматического посадочного аппарата Surveyor-3. На заднем плане фотографии виден посадочный модуль Apollo 12 [182] (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Surveyor_3-Apollo_12.jpg).

верхности Луны. Этот анализ стал возможным благодаря тому, что посадочный модуль пилотируемого аппарата Apollo 12 совершил планируемую посадку в непосредственной близости от места посадки аппарата Surveyor-3. Ко времени прибытия (24 ноября 1969 г.) на поверхность Луны модуля Apollo 12 посадочный аппарат Surveyor-3 (дата посадки на Луну 20 апреля 1967 г.) находился на поверхности Луны уже более 2,5 лет. Расстояние между посадочными аппаратами составляло ~ 83 м [181]. На рисунке 18 представлена фотография командира миссии Apollo 12 астронавта Чарлза Конрада (Charles Conrad) у автоматического посадочного аппарата Surveyor-3. На заднем плане фотографии виден посадочный модуль Apollo 12 [182].

На Землю были доставлены некоторые системы и оборудование, снятые с аппарата Surveyor-3. По результатам их лабораторных исследований было отмечено большое число особенностей изменений поверхности посадочного аппарата и его систем. В частности, было обнаружено обесцвечивание поверхностей фотоиндуцированным воздействием. Практически все открытые поверхности камеры были частично покрыты тонким слоем лунной пыли. Существовали заметные различия в количестве и видимом размере частиц пыли на различных поверхностях. Детальный анализ показал, что мелкие частицы были имплантированы на космический корабль в первую очередь при первоначальной посадке Surveyor-3, а также позднее, при приближении и посадке лунного модуля Apollo 12. Присутствие пыли, даже в очень малых количествах, может существенно повлиять на системы контроля температуры и характеристики оборудования на поверхности Луны. Было доказано, что посадка лунного модуля Apollo 12 дополнительно внесла слой пыли на поверхности служебных систем аппарата Surveyor-3. Был также выполнен анализ органических загрязнений, анализ микрометеорных ударов о поверхность аппарата, анализ радиационных повреждений и др.

Тем не менее основной вывод из анализа состояния оптических систем при длительной экспозиции (несколько десятилетий) и состояния служебных систем посадочного аппарата Surveyor-3 после пребывания на поверхности Луны в течение более 2,5 лет заключается в том, что воздействие плазменно-пылевой экзосферы, и в частности левитирующих пылевых частиц, в естественных природных условиях не оказывает существенного влияния на чувствительные поверхности и состояние инженерных систем посадочных аппаратов.

4.2. Особенности антропогенного фактора

Результаты выполнения шести пилотируемых экспедиций по программе Apollo показали, что ситуация существенно меняется при воздействии на реголит и экзосферу Луны антропогенных факторов. К таким факторам относятся, например, работа двигателей посадочных аппаратов при посадке на поверхность Луны и взлёте с её поверхности, движение астронавтов или ровера по поверхности реголита, работа робототехнических систем на поверхности (например, бурильной установки). В таких случаях, кроме естественных, природных процессов, влияющих на динамику пылевых частиц, возникает так называемая "дополнительная пыль" ("collateral dust") [183]. Причём перенос такой "дополнительной пыли" антропогенного происхождения будет на несколько порядков выше, чем перенос естественной пыли [30]. "Дополнительная" пыль вызывает гораздо более существенное воздействие на служебные системы, деятельность астронавтов и их здоровье, чем естественные процессы переноса пыли. Таким образом, отмечалось, что влияние "дополнительной" пыли представляет собой гораздо большую угрозу безопасности астронавтов и успеху миссии (например, [17, 18, 30, 179, 184]).

Результаты воздействия дополнительной лунной пыли на системы посадочного аппарата и деятельность астронавтов на поверхности Луны при выполнении шести экспедиций Apollo на поверхности Луны были систематизированы по девяти категориям:

- 1) ухудшение видимости при поднятии пыли;
- 2) ложные показания приборов;
- 3) осаждение пыли и загрязнение поверхностей;
- 4) потеря сцепления с грунтом при движении по поверхности;
- 5) заклинивание вращающихся узлов механизмов;
- 6) активная эрозия поверхностей;
- 7) проблемы с системой терморегулирования и её контроля;
- 8) нарушение уплотнений и герметичности систем;
- 9) проблемы с дыханием и другие факторы, связанные со здоровьем человека [17].

С проблемой ухудшения видимости впервые столкнулись астронавты во время посадки при работающих двигателях лунного модуля Apollo 11. Приблизительно на высоте 30 м от поверхности из-за работы двигателей торможения возникло облако пыли, которое становилось всё плотнее по мере уменьшения высоты. Была угроза, что одна из посадочных опор коснётся крупного камня или попадёт в небольшой кратер. Поэтому для посадки следующих аппаратов Apollo 14, 15 и 16 на поверхность Луны профиль посадки был скорректирован. Однако и в этих случаях были трудности при осмотре площадки перед контактом с поверхностью. С проблемой видимости из-за пыли был связан и тот факт,

что датчики скорости посадки аппаратов Apollo 12 и 15 давали ложные показания из-за облака пыли, возникшего при работе двигателей, обеспечивающих мягкую посадку аппарата [17].

Лунная пыль оказалась крайне абразивной. По рассказам астронавтов, после работы вне посадочного модуля циферблаты приборов и солнцезащитные козырьки их шлемов были настолько исцарапаны, что невозможно было прочитать показания. Астронавты отмечали, что после 8 часов работы на поверхности Луны скафандры и перчатки, особенно после работы по бурению грунта, имели значительные потёртости и, если бы возникла необходимость выполнить ещё один или два дополнительных выхода из посадочного модуля, они могли бы потерять герметичность [17]. Например, скафандр Пита Конрада (Pete Conrad, Jr.), командира миссии Apollo 12, являвшийся герметичным до первого выхода из посадочного модуля, терял давление со скоростью $\sim 0,01$ атм мин^{-1} после первого выхода и $\sim 0,017$ атм мин^{-1} после второго выхода. Так как безопасная утечка составляла $0,02$ атм мин^{-1} , была сомнительна безопасность третьего выхода, если бы он был запланирован. Пыль, проникшая в подвижные узлы скафандра, привела к таким большим затруднениям при движении, что ещё один запланированный выход из посадочного модуля был невозможен [17]. Застёжками типа "молния" на скафандрах после работы вне посадочного модуля было невозможно пользоваться. Абразивные свойства лунной пыли воздействовали не только на служебные системы и деятельность астронавтов, но и на научные результаты, в частности, из-за воздействия пыли герметичность всех запечатанных образцов лунной атмосферы, доставленных на Землю для анализа, была нарушена и, таким образом, все они оказались бесполезными. Отмечалось, что при долгосрочном пребывании на Луне для сохранения безопасных условий среды обитания следует уделять больше внимания способам обеспечения герметичности систем, скафандров, создания более пылеустойчивых уплотнений.

При работе астронавтов на поверхности было обнаружено, что пыль быстро покрывает все поверхности, с которыми она контактировала, включая скафандры, обувь астронавтов, ручной инструмент, оборудование и системы аппарата. Осаждение пыли требовало от астронавтов выполнения дополнительной работы по очистке одежды, оборудования, однако и это оказывалось неэффективным. Попытки удалить пыль в лунных условиях были неэффективными, что никак не согласовывалось с результатами наземных испытаний. Последнее приводило к тому, что рабочая температура некоторых систем превышала ожидаемую на 20°C и отдельные приборы аппаратов Apollo 16 и 17 из-за перегрева ухудшили свои характеристики. Именно по данной причине Джон Янг (John Young), командир экспедиции Apollo 16, заметил, что "пыль — это проблема номер один при возвращении на Луну".

Однако самым неприятным фактором лунной пыли является её влияние на здоровье человека. Для Российской лунной программы данные проблемы планируется исследовать в Институте медико-биологических проблем Российской академии наук (ИМБП РАН). Здесь мы лишь отметим отзывы американских астронавтов о работе на поверхности Луны. Члены экипажей посадочных аппаратов Apollo сообщали, что микрочастицы



Рис. 19. Фотография Юджина Сернана (Eugene Cernan), командира миссии Apollo 17, в запылённом скафандре в посадочном модуле после работы на поверхности Луны. Фрагмент фото НАСА (<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/eugene-cernan-was-more-just-last-astonaut-moon-180961830/>) [18].

лунной пыли вызывали раздражения кожи, глаз, системы дыхания. Лунная пыль характеризуется резким запахом, напоминающим запах пороха, что, видимо, является следствием присутствия летучих веществ на поверхности пылевых частиц. Пыль проникала сквозь одежду астронавтов и, сняв одежду, астронавты обнаруживали, что покрыты пылью. Попад в лунный модуль, во время полёта к Земле, в условиях отсутствия гравитации, пыль поднималась и распространялась по объёму космического аппарата. Экипаж дышал этой атмосферой с пылью, она раздражала глаза. Имевшиеся на борту средства очистки от пыли были неэффективны. После обнаружения таких свойств лунной пыли во время первой экспедиции, были приняты меры с целью уменьшить подобное влияние в последующих экспедициях. Тем не менее токсичность микронных и субмикронных частиц, обнаруженных на материале скафандров, указывает на необходимость постоянного контроля концентрации частиц внутри посадочного модуля, а в будущем — и в долгосрочной среде обитания на лунных научных станциях [184]. На фото (рис. 19) Юджин Сернан (Eugene Cernan), командир миссии Apollo 17, в запылённом скафандре в посадочном модуле после работы на поверхности Луны.

Анализируя опыт выполнения программы Apollo, можно сделать вывод, что серьёзность проблемы пыли была недооценена [179]. При подготовке программы "Apollo" учитывались свойства плазменно-пылевой экосферы при естественных, природных условиях на Луне, при которых динамика пыли определяется электростатическими процессами, как следствие воздействия солнечных излучений и потоков микрометеоритов на поверхность реголита. При этих условиях, как показали результаты выполнения экспериментов на автоматических посадочных аппаратах, влияние динамики пыли хотя и было заметным, но не оказывало критического влияния на работу научной и служебной аппаратуры. Кардинально иная степень влияния пылевых частиц на служебные системы посадочных аппаратов оказалась при выполнении пилотируемой программы исследований, связанная с антропогенной активностью, деятельностью человека на поверхности. Возникающая при таких дина-

мических условиях "дополнительная" пыль ("collateral dust"), обусловленная механическим воздействием деятельности человека на поверхность реголита, значительно более опасна по сравнению с естественной пылью. В отчётах о результатах выполнения экспедиций Apollo отмечалось, что перенос пыли, связанной с деятельностью астронавтов на поверхности Луны, может быть на порядки выше, чем перенос пыли в результате природных процессов [30]. Поэтому активные работы на поверхности Луны могут быть очень опасны как для астронавтов, систем жизнеобеспечения, так и для служебных систем посадочных аппаратов и оборудования, используемого астронавтами.

Необычные свойства лунной пыли проникать сквозь уплотнения герметичных систем и "прилипать" к различным поверхностям могут быть рассмотрены с точки зрения динамических свойств левитирующих над поверхностью частиц. Вследствие ударного происхождения таких частиц их формы крайне нерегулярны и большинство их имеют острые края [70, 74]. Как было показано выше (см. раздел 3.4), левитирующие над поверхностью реголита пылинки с характерным размером в десятки нанометров при отрыве от поверхности могут приобрести угловой момент и быстро вращаться [164]. Подобные вращающиеся минеральные частицы при взаимодействии с препятствием являются не просто "ударником", но могут оказаться своеобразным режущим "инструментом", напоминающим миниатюрные подобия восточных метательных звёздочек "сюрикен" (shuriken, или pinja stars), обладающих большой поражающей силой. На рисунке 20 представлены фотографии микрочастиц и примеры звёздочек "сюрикен".

Возможно, именно эта особенность, в сочетании с имеющимся электростатическим зарядом, объясняет удивительную способность "дополнительной" пыли, возникающей при антропогенном воздействии на лунный реголит, агрессивно воздействовать на поверхности чувствительных систем приборов и служебных систем посадочных аппаратов, проникать сквозь герметические уплотнители и воздействовать на человека, казалось бы, защищённого от подобного воздействия. Опыт выполнения пилотируемой программы Apollo привёл к развитию

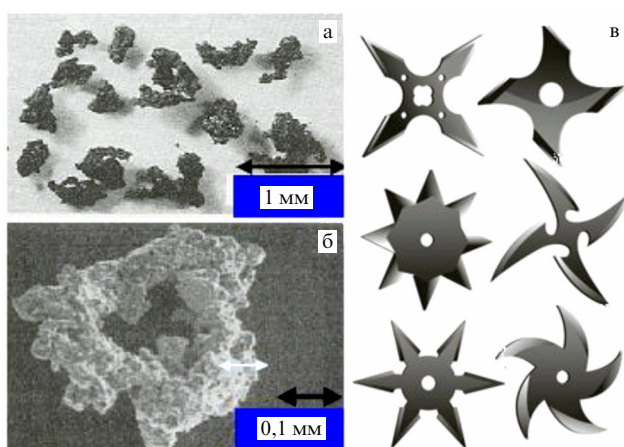


Рис. 20. (а, б) Фотографии частиц лунной пыли, сделанные под микроскопом (https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/22apr_dontinhale). (в) Примеры изображений метательных звёздочек сюрикен (<https://army-today.ru/oruzhie/syuriken>).

нового научного-практического направления исследований — разработке методов и средств минимизации влияния лунной пыли (см., например, обзор [185]).

5. Нерешённые проблемы динамики лунных плазменно-пылевых процессов

Исследования Луны, выполненные более 50 лет назад, на заре космической эры, стали стимулом интенсивных аналитических и лабораторных исследований по моделированию физических процессов, происходящих у поверхности Луны. Результаты таких работ показали, что моделирование подобных процессов не удаётся выполнить с приемлемой точностью. В основном это связано с незнанием многих важных параметров, реально отражающих состояние изучаемой среды, и даже неплохо известные параметры воспроизводимы в земных лабораторных условиях лишь с очень большим трудом. На сегодняшний день остаётся немало нерешённых проблем, затрудняющих изучение физических процессов, связанных с динамикой лунной пыли. Ниже перечислены лишь основные из них, которые для удобства мы классифицировали по нескольким категориям.

Уточнение физических свойств реголита. Это касается, прежде всего, тех свойств реголита, которые влияют на процессы фотоэмиссии и электрической проводимости реголита. В частности, до сих пор недостаточно точно известны такие параметры материала реголита, как: работа выхода, квантовый выход, влияние нанофазного железа, зависимость электрической проводимости от температуры и присутствия молекул воды в верхних слоях реголита. Перечисленные параметры во многом определяют интенсивности поверхностных токов, возникающих при воздействии внешних факторов космической среды, величины электрического заряда поверхности, характеристики двойных слоёв и параметры приповерхностной плазмы. Упомянутые характеристики реголита могут быть получены *in situ* либо лабораторным анализом образцов реголита, доставленных на Землю.

Проблема отрыва микрочастиц от поверхности реголита. В настоящее время принято считать, что наиболее вероятной причиной отрыва пылевых частиц от освещённой поверхности безатмосферных небесных тел является электростатическое поле. При этом на микрочастицу, лежащую на поверхности реголита, действуют по крайней мере три силы: сила адгезии, сила тяжести, удерживающие частицу на поверхности, и электростатическая сила, пытающаяся оторвать частицу от поверхности. В данной проблеме существует несколько ключевых открытых вопросов, прежде всего, оценка влияния силы адгезии Ван-дер-Ваальса. Эта сила и сила гравитации конкурируют между собой в зависимости от размера, формы и массы частиц. Причём сила адгезии во многом зависит от формы поверхности частиц в месте их соприкосновения. Поэтому оценка величины силы адгезии при моделировании достаточно затруднена. Однако ключевой вопрос при решении проблемы отрыва частиц: каким образом электрический заряд, необходимый для отрыва от поверхности, может накапливаться на пылинке, ещё лежащей на поверхности [6]? К настоящему времени существуют несколько работ, посвящённых решению названной проблемы (например, [9, 152, 154, 155]). В перечисленных работах предложены различ-

ные походы к решению проблемы возникновения достаточно сильного электрического поля, действующего на частицу, способного преодолеть силы, удерживающие частицу, и оторвать её от поверхности. Однако ни одна из существующих моделей не предлагает самосогласованной теории такого физического процесса, которая бы определила величину потока микрочастиц, поднятых с поверхности, их массу, скорость, величину электрического заряда, параметры приповерхностного электрического поля в возникающем плазменном слое. На сегодняшний день представляется, что процессы отрыва пылевых частиц от поверхности и их динамика сложнее, чем предполагалось ранее, и существующие модели требуют корректировки. Для объяснения отрыва частиц от поверхности, по-видимому, следует основываться не только на усреднённом описании аккумуляции электрического заряда приповерхностными пылевыми частицами, но учитывать и случайный характер этих процессов, основанный на дискретном характере взаимодействия частиц плазмы и УФ-излучения с реголитом. Предварительное рассмотрение показывает, что термодинамические процессы также могут играть роль в процессах отрыва субмикронных частиц от поверхности. Решение проблемы отрыва микрочастиц от поверхности реголита важно для создания самосогласованного описания динамики микрочастиц лунного реголита при воздействии солнечного излучения, солнечной плазмы и микрометеороидов.

Плазменно-пылевые процессы в районе терминатора на границе света и тени. Особенность данных областей заключается в том, что на границе света и тени резко изменяются механизмы приобретения реголитом заряда. Как обсуждалось выше, на освещённой Солнцем стороне Луны реголит приобретает положительный заряд в результате фотоэффекта. На ночной стороне либо в затенённой области дневной стороны основную роль играют электроны набегающего потока межпланетной плазмы, и поверхность заряжается отрицательно. Именно в районе терминатора были зарегистрированы свечения над горизонтом (LHG), давшие импульс исследованиям лунной пыли. Для области терминатора, где зенитный угол Солнца приближается к 90° , важную роль играют неоднородности поверхности реголита, когда резкие границы света и тени приобретают существенно локальный характер. Исследованиям плазменно-пылевых процессов в области терминатора было посвящено достаточно много работ, однако характер плазменно-пылевых процессов в этих областях остаётся открытым. Остаётся открытым и вопрос о возможном эффекте наблюдательной селекции LHG в районе терминатора и условиях наблюдений левитирующих пылевых частиц вне границы света и тени.

Процессы в зонах магнитных аномалий. Существование на поверхности Луны локальных зон с повышенной величиной магнитного поля приводит к особенностям взаимодействия набегающего потока плазмы, создавая в данных зонах мини-магнитосферы, которые изменяют условия взаимодействия плазмы с реголитом. Эти особенности были обнаружены по измерениям с орбитальных лунных аппаратов, позволяющим изучить такие аномалии лишь в самых общих чертах. Например, с магнитными аномалиями часто ассоциируются так называемые лунные "вихри" — области с повышенным альбедо, где, по-видимому, повышен перенос пыли

вдоль лунной поверхности. Безусловно, все эти особенности, замеченные с лунных орбитальных аппаратов, представляют большой интерес и требуют дальнейших исследований динамики плазменно-пылевой экзосферы в таких зонах *in situ*.

Роль "дополнительной" пыли. Среди нерешённых проблем следует упомянуть проблему, связанную с агрессивным влиянием "дополнительной" пыли, обнаруженной при выполнении американской пилотируемой экспедиции Apollo, обзор которой был дан в разделе 3. Несмотря на то что данная проблема не связана с естественными, природными физическими процессами, происходящими на Луне, опыт выполнения программы Apollo поставил несколько важных вопросов, связанных с влиянием "дополнительной" лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов, деятельность и здоровье астронавтов, находящихся на Луне. Ввиду планируемых некоторыми странами расширения исследований Луны и дальнейшего возможного её освоения с участием человека требуются лабораторные исследования, направленные на изучение влияния заряженной пыли на материалы, системы космических аппаратов, на развитие методов минимизации такого влияния [185]. Очевидно, что такое "практическое" направление в изучении динамики лунной пыли и создании средств уменьшения её негативного влияния также имеет большое значение. В связи с этим встаёт проблема создания теоретических моделей "возмущённого" состояния приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы, имитирующего возникновение "дополнительной" пыли при антропогенном воздействии.

Приведённые выше нерешённые проблемы, на наш взгляд, представляются наиболее важными, но, безусловно, они не исчерпывают всех вопросов, которые стоят на пути понимания физических процессов, происходящих при воздействии внешних факторов космического пространства на Луну, её реголит и создания адекватных моделей таких процессов.

6. Вместо заключения

Обнаружение свечения над лунным горизонтом стало самым неожиданным открытием, зарегистрированным советскими и американскими лунными посадочными аппаратами ещё на самых ранних этапах исследования Луны. Анализ данных наблюдений привёл к предположениям, что наблюдаемое свечение связано с рассеянием солнечного света на микрочастицах, левитирующих над поверхностью реголита, на высотах в несколько десятков сантиметров. Выполнение шести пилотируемых экспедиций на поверхность Луны по программе NASA Apollo показало, что левитирующие частицы оказывают крайне отрицательное воздействие на инженерные системы лунных посадочных аппаратов, а также на деятельность и здоровье астронавтов. Более того, опыт выполнения пилотируемых экспедиций на поверхности Луны показал, что антропогенная активность оказывает значительно большее влияние на динамику лунной пыли в сравнении с естественными, природными процессами, происходящими на Луне. В отчётах астронавтов о результатах экспедиций говорилось, что "проблема пыли" является наиболее сложной и трудно преодолимой при деятельности человека на Луне. Все эти результаты, полученные автоматическими и пилотируемыми

экспедициями, показали, что изучение наблюдаемых эффектов и процессов, связанных с лунной пылью, имеет не только научное, но и практическое значение при реализации дальнейших планов возможного освоения Луны.

Результаты пионерских исследований Луны стали триггером развития нового научного направления, связанного с так называемой "комплексной плазмой", в частности, пылевой плазмой, в которой кроме обычных ионов присутствуют заряженные микрочастицы. Ввиду очевидных трудностей проведения натуральных экспериментов на поверхности Луны основные результаты были в последующем получены при разработке теоретических моделей и с помощью лабораторного моделирования. При этом сложность адекватного моделирования связана не только с условиями создания глубокого вакуума и пониженной гравитации, характерными для Луны, но прежде всего со специфическими свойствами самих микрочастиц лунной пыли, которые формировались в процессе высокоскоростных ударов микрометеоритов и которые не встречаются в естественных условиях на Земле. С практической точки зрения такие исследования важны для оценки воздействия микрочастиц на различные материалы, служебные системы, механические узлы, герметические уплотнители. Особым и чрезвычайно важным направлением являются исследования воздействия лунной пыли на деятельность космонавтов на поверхности Луны и на здоровье человека.

В числе важных составляющих лабораторного моделирования — создание аналогов лунного реголита, характеристики которых близки к основным параметрам лунной пыли. Наиболее часто рассматриваются аналоги по химическому, минералогическому, гранулометрическому составу, по специфическим особенностям пылевых частиц, например, их крайне нерегулярной форме, учёту содержания на поверхности пылинок нанофазного железа и другим специфическим для Луны характеристикам. Созданию аналогов лунного реголита и его составляющей — лунной пыли — в настоящее время уделяется большое внимание (см., например, [186]). Архив существующих аналогов реголита (Planetary Simulant Database, <https://simulantdatab.com/index.php>) по состоянию на 2021 г. включает 43 зарегистрированных наименования аналогов, созданных в США, Китае и в нескольких других странах. Два из этих аналогов использовались при подготовке китайской миссии Chang'e-5, доставившей в 2021 г. на Землю образцы лунного реголита.

В нашей стране лабораторные эксперименты с пылевой плазмой были начаты под руководством В.Е. Фортова и продолжают развиваться в Объединённом институте высоких температур РАН [187]. Активные работы по моделированию динамики пылевых частиц, имитирующие различные условия космического пространства, проводятся на лабораторных установках Института космических исследований РАН, Института прикладной физики РАН и других организаций. Эти исследования включают эксперименты по лабораторному моделированию не только плазменно-пылевых процессов у Луны, но и разнообразных явлений, происходящих в других областях Солнечной системы, в которых пылевые частицы играют существенную, а иногда и определяющую роль. Например, планетные пылевые облака, пылевые бури на Марсе, кометные комы, "пылевые озёра" на астероиде Эрос [188] и на ядре кометы Чурюмова–Герасименко [189], радиальные спицы, периодически появляющиеся в кольцах Сатурна [190], и множество других явлений в Солнечной системе и во Вселенной в целом. Важным этапом развития научных исследований в данном направлении является создание Государственной корпорацией Росатом специализированного Национального центра физики и математики (НЦФМ), направленного на экспериментальные исследования астрофизических процессов методами лабораторного моделирования. Одним из научных направлений НЦФМ станет исследование плазменно-пылевых процессов в приповерхностной экзосфере Луны.

В настоящее время космические агентства нескольких стран готовят проекты для изучения Луны с помощью орбитальных и посадочных космических аппаратов. Китайская Народная Республика в последние годы уже успешно выполнила несколько экспедиций, включая проект Chang'e 4 — посадка на обратной стороне Луны, Chang'e 5 — доставка образцов лунного реголита на Землю. В ближайшие годы в КНР планируется продолжение этой программы по исследованию Южной полярной области, созданию там инфраструктуры с целью изучения природных ресурсов и возможного их освоения. Развиваются исследования Луны в Индии. После выполнения двух индийских орбитальных экспедиций Chandrayaan 1 и 2, в августе 2023 г. была успешно выполнена экспедиция Chandrayaan 3 с посадкой в Южном полярном регионе. Исследования Луны также в планах Японии, Европейского космического агентства. Американское космическое агентство NASA при содействии более 20 стран готовит амбициозную программу исследований Луны ARTEMIS с участием человека.

В нашей стране, после почти пятидесятилетнего перерыва в исследованиях Луны с помощью космических аппаратов, в соответствии с Федеральной космической программой в ближайшие годы планируется запуск серии лунных посадочных и орбитальных аппаратов, "Луна-25", "Луна-26", "Луна-27" и др. Научная программа этих исследований направлена на продолжение изучения Луны на новом уровне развития техники космических научных исследований. Планируется, что посадочные аппараты будут исследовать окрестности Южного полюса Луны [191], где до сих пор не осуществлялись посадки космических аппаратов. Данная область Луны обладает несколькими специфическими и очень важными особенностями, в частности:

1) в связи с тем что ось вращения Луны почти перпендикулярна к плоскости эклиптики, в приполярных областях Луны существуют места, в которых поверхность почти всегда освещена Солнцем (следовательно, обеспечен почти постоянный источник солнечной энергии), кроме того, в таких местах может быть обеспечена практически постоянно радиосвязь с Землёй;

2) по измерениям, выполненным российским прибором LEND, установленным на американском лунном спутнике LRO, в полярных областях Луны существуют районы с пониженным содержанием нейтронов, отражённых в результате их рассеяния в реголите (так называемое альbedo нейтронов), что связывается с присутствием водяного льда в подповерхностных слоях реголита [192];

3) полярные районы Луны по характеру изменения зенитного угла Солнца очень близки к зонам термина-

тора, где резко меняются условия освещения поверхности; эта особенность чрезвычайно интересна для научных исследований с точки зрения выяснения конкурирующего влияния солнечного освещения и потоков плазмы солнечного ветра на процессы зарядки поверхности, а также изучения особенностей динамики пылевых частиц лунного реголита в таких областях.

Программа научных исследований на планируемых посадочных аппаратах "Луна-25" и "Луна-27" подразумевает 1) исследования состава, физико-механических и термофизических свойств реголита в приповерхностном слое до глубины 1–2 м, оценку массовой доли водяного льда в полярном реголите, выяснение происхождения воды в полярном реголите, а также 2) изучение свойств и динамики плазменной, нейтральной и пылевой компонент в лунной полярной экзосфере.

В состав комплекса научной аппаратуры посадочных аппаратов "Луна-25" и "Луна-27" включён прибор "Пылевой мониторинг Луны" (ПМЛ), направленный на регистрацию микрочастиц лунной пыли, левитирующих над поверхностью реголита, и определение параметров приповерхностной плазмы, в которой происходит движение пылевых частиц. С помощью этого прибора на каждом лунном посадочном аппарате планируется в течение длительного времени проводить регистрацию микрочастиц, левитирующих над поверхностью Луны, оценку их физических характеристик, а также осуществлять мониторинг параметров приповерхностной плазменно-пылевой среды (концентрация, температура, потенциал) [193, 194].

Прибор ПМЛ на КА "Луна-25" включает три элемента: блок ударных сенсоров (УС) и два электростатических датчика ЭД-1 и ЭД-2. Чувствительными элементами блока УС являются 24 пьезоэлектрические пластины, общая апертура составляет $\sim 150 \times 150$ мм. Каждый из блоков ЭД включает два датчика: зонд Ленгмюра и индукционный датчик заряда. На рисунке 21 представлены фотографии блоков прибора ПМЛ и фотография посадочного аппарата "Луна-25" во время испытаний с указанием мест расположения блоков ПМЛ.

Параметры лунной среды, исследуемые прибором ПМЛ, весьма чувствительны к влиянию наведённого электрического потенциала посадочного аппарата. К сожалению, на борту КА "Луна-25" не было возможности разместить штангу для установки на ней чувствительных элементов блоков прибора с целью исключения влияния посадочного аппарата на измерения. Поэтому методом

численного моделирования была выполнена оценка воздействия КА на окружающую среду, с целью учёта этого влияния при анализе выполненных измерений [195].

Запуск космического аппарата "Луна-25" состоялся в августе 2023 г., во время подготовки настоящей статьи. После перелёта от Земли к Луне КА успешно вышел на круговую лунную орбиту высокой 100 км над лунной поверхностью. На данной орбите прибор ПМЛ включался для проверки его работоспособности. Результаты включения прибора показали его работоспособность и готовность проводить измерения на поверхности Луны. За время (~ 45 мин) включения ПМЛ одновременно 10 (из 24) пьезодатчиков прибора зарегистрировали ударное событие. Предварительный анализ этого события приводит к выводу, что такой отклик прибора может быть вызван попаданием в корпус прибора микрометеороида, связанного с ежегодно повторяющимся в августе метеорным потоком Персеиды.

При выполнении дальнейшей полётной программы — переводе КА на предпосадочную эллиптическую орбиту, произошёл сбой в системе управления, и космический аппарат был потерян. Госкорпорации Роскосмос предстоит решить вопрос, что делать: либо несколько скорректировать, либо продолжить выполнение ранее намеченной программы исследований Луны.

В соответствии с существующей в настоящее время космической программой, следующим посадочным аппаратом на поверхность Луны (после КА "Луна-25") должен быть КА "Луна-27". Прибор ПМЛ для данного аппарата строится по схеме, аналогичной схеме прибора, установленного на КА "Луна-25". Однако, в отличие от КА "Луна-25", в составе "пылевого" прибора для КА "Луна-27" имеется штанга, на которой будут размещены чувствительные датчики ударных воздействий для регистрации микрочастиц над поверхностью реголита, зонды Ленгмюра и индукционные датчики заряда пылевых частиц. Эта штанга позволит в значительной степени минимизировать влияние посадочного аппарата на результаты измерений [195]. Зонды Ленгмюра расположены на штанге на разных высотах от поверхности для определения вертикальной компоненты приповерхностного электрического поля. На рисунке 22 изображена схема фрагмента корпуса посадочного аппарата, установленные на нём блоки прибора ПМЛ и штанга в развёрнутом состоянии.

Прибор ПМЛ на борту КА "Луна-27" подразумевает регистрацию микрочастиц, поднятых с поверхности реголита под воздействием солнечных излучений, вторичных частиц, выбитых при высокоскоростных ударах микрометеороидов вблизи места посадки КА. Электрические датчики в составе прибора предназначены для определения основных параметров приповерхностной плазмы и электрических полей в приповерхностной экзосфере и вблизи корпуса посадочного аппарата (что позволит определить влияние КА на диагностику плазмы). Датчики прибора позволяют проследить изменения параметров приповерхностной плазменно-пылевой среды в зависимости от местного времени и солнечной активности. Программа работы прибора ПМЛ включает длительные измерения на поверхности Луны. Это даст возможность, как надеются авторы эксперимента, сравнить на временном масштабе одной или нескольких лунаций (одна лунация приблизительно около 29 земных суток) состояние плазменно-пылевой экзосферы, "воз-

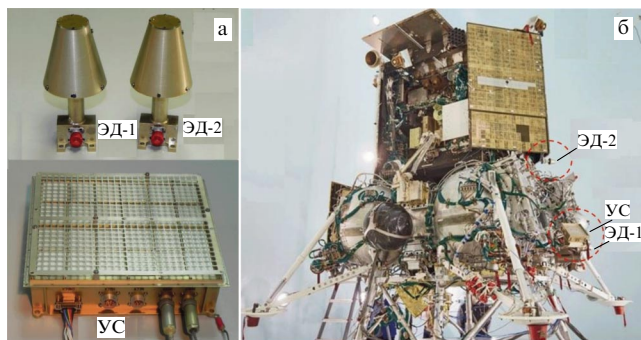


Рис. 21. (а) Фотографии блоков ПМЛ. (б) Фото космического аппарата "Луна-25" во время испытаний. На этом фото указаны положения блоков прибора ПМЛ на корпусе аппарата.

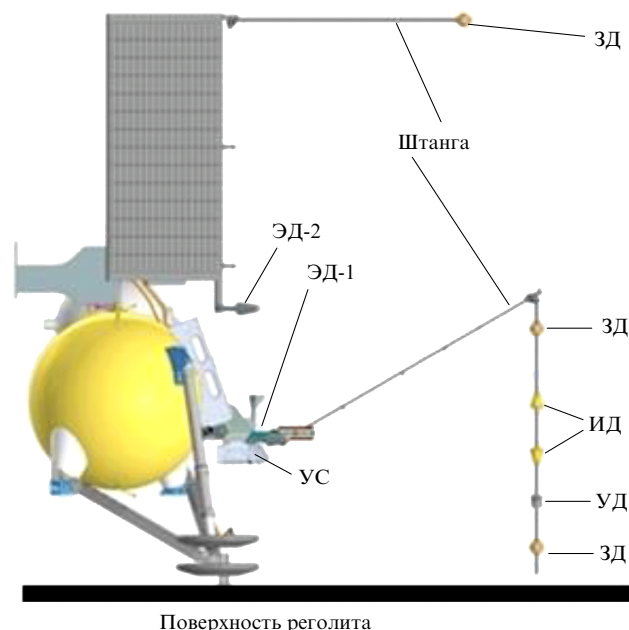


Рис. 22. Фрагмент схемы космического аппарата "Луна-27". Показано расположение блоков прибора ПМЛ: УС (ударный сенсор), ЭД-1, ЭД-2 (электрические датчики), а также штанга с тремя зондовыми датчиками (ЗД, зонды Ленгмюра), двумя индукционными датчиками (ИД) и ударными датчиками (УД, пьезокерамические пластины).

мущённое" работой двигателей при посадке космического аппарата, т.е. в присутствии "дополнительной пыли", с состоянием лунной среды, определяемой естественными внешними факторами. Совокупность всех этих данных позволит получить важные приоритетные результаты, которые, как надеются участники планируемых исследований, помогут приблизиться к выяснению механизмов и особенностей динамики лунной пыли и приповерхностной плазмы в полярной области Луны.

Благодарности

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН (тема "Планета") с участием Института физики металлов УрО РАН (госзадание "Электрон" г.р. № 122021000039-4) и поддержана Государственной корпорацией по атомной энергии Росатом в рамках направления "Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика" Научного центра физики и математики.

Список литературы

- Criswell D R, in *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, Proc. of the 6th ESLAB Symp., Noordwijk, September 26–29, 1972* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 37, Ed. R J L Grard) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1973) p. 545
- Rennison J J, Criswell D R *The Moon* **10** 121 (1974)
- Berg O E, Wolf H, Rhee J, in *Interplanetary Dust and Zodiacal Light, Proc. of IAU Colloq. 31, Heidelberg, Germany, 10–13 June 1975* (Lecture Notes in Physics, Vol. 48, Eds H Elsaesser, H Fechtig) (Berlin: Springer, 1976) p. 233, https://doi.org/10.1007/3-540-07615-8_486
- Carrier W D (III), Olhoef G R, Mendell W et al., in *The Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon* (Eds G H Heiken, D T Vaniman, B M French) (New York: Cambridge Univ. Press, 1991) p. 475
- Colwell J E et al. *Rev. Geophys.* **45** RG2006/2007 (2007) <https://doi.org/10.1029/2005RG000184>
- Hartzell C M, Scheeres D J *Planet. Space Sci.* **59** 1758 (2011)
- Nitter T et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** 159 (1994)
- Borisov N, Mall U J. *Plasma Phys.* **67** 277 (2002)
- Borisov N, Mall U *Planet. Space Sci.* **54** 572 (2006)
- Poppe A, Horányi M J. *Geophys. Res.* **115** A08106 (2010)
- Попель С И и др. *Письма в ЖЭТФ* **99** 131 (2014); Popel S I et al. *JETP Lett.* **99** 115 (2014)
- Popel S I et al. *Planet. Space Sci.* **156** 71 (2018)
- Sickafoose A A et al. *J. Geophys. Res.* **107** (A11) 1408 (2002) <https://doi.org/10.1029/2002JA009347>
- Wang X, Horanyi M, Robertson S J. *Geophys. Res.* **114** A05103 (2009) <https://doi.org/10.1029/2008JA013983>
- Dyal P, Parkin C W, Daily W D, in *Lunar Science Conf., 8th, Houston, Tex., March 14–18, 1977, Proc. Vol. 1* (New York: Pergamon Press, 1977) p. 767
- Olhoef G R et al. *The Moon* **9** 79 (1974)
- Gaier J R, Technical Memorandum NASA/TM-2005-213610 (Hanover, MD: NASA Center for Aerospace Information, 2005)
- Linnarsson D et al. *Planet. Space Sci.* **74** 57 (2012)
- Pieters C M, Noble S K J. *Geophys. Res. Planets* **121** 1865 (2016)
- Kallio E et al. *Planet. Space Sci.* **166** 9 (2019)
- O'Brien P O et al., in *50th Lunar and Planetary Science Conf., March 18–22, 2019, The Woodlands, Texas* (LPI Contrib., No. 2132) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2019)
- Grün E et al. *Icarus* **62** 244 (1985)
- Melosh H J *Impact Cratering: a Geologic Process* (New York: Oxford Univ. Press, 1989); Пер. на русск. яз.: Мелос Г Д *Образование ударных кратеров: геологический процесс* (М.: Мир, 1994)
- Попель С И и др. *Письма в ЖЭТФ* **103** 641 (2016); Popel S I et al. *JETP Lett.* **103** 563 (2016)
- Horányi M et al. *Nature* **522** 324 (2015)
- Krüger H et al. *Icarus* **164** 1170 (2003)
- Zook H A, in *Proc. of the Sixth Lunar Science Conf., Houston, Texas, March 17–21, 1975* (New York: Pergamon Press, 1975) p. 163
- Grün E, Horanyi M, Sternovsky Z *Planet. Space Sci.* **59** 1672 (2011)
- Brownlee D, Bucher W, Hodge P, in *Analysis of Surveyor 3 Material and Photographs Returned by Apollo 12* (NASA SP-284, Eds W F Carroll et al.) (Washington, DC: NASA, 1972) p. 143
- Katzan C M, Edwards J L, NASA Contractor Report 4404 (Washington, DC: NASA, 1991)
- Liu Y, Taylor L A *Planet. Space Sci.* **59** 1769 (2011)
- Li D et al. *J. Geophys. Res. Planets* **124** 2168 (2019)
- Zhang H et al. *Sci. China Tech. Sci.* **63** 520 (2020)
- Голубь А П, Попель С И *Астрон. вестник* **55** 393 (2021); Golub' A P, Popel S I *Solar Syst. Res.* **55** 389 (2021)
- Haskin L, Warren P, in *The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon* (Eds G H Heiken, D T Vaniman, B M French) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991) p. 357
- Walker R M *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **3** 99 (1975)
- Wurz P et al. *Icarus* **191** 486 (2007)
- Tsurutani B T, Jones D E, Sibeck D G *Geophys. Res. Lett.* **11** 1066 (1984)
- Tsurutani B T et al. *Geophys. Res. Lett.* **11** 1062 (1984)
- Peterson W K, Shelley E G J. *Geophys. Res.* **89** 6729 (1984)
- Frank L A *Space Sci. Rev.* **42** 211 (1985)
- Rich F J, Reasoner D L, Burke W J J. *Geophys. Res.* **78** 8097 (1973)
- Clay D R et al. *J. Geophys. Res.* **80** 1751 (1975)
- Vaverka J et al. *Astrophys. J.* **825** 133 (2016)
- Reedy R C, Arnold J R J. *Geophys. Res.* **77** 537 (1972)
- Hendrix A R et al. *J. Geophys. Res.* **117** E12001 (2012)
- Li X et al., in *Moon. Prospective Energy and Material Resources* (Ed. V Badescu) (Berlin: Springer, 2012) p. 347, https://doi.org/10.1007/978-3-642-27969-0_15
- Jia B et al. *J. Geophys. Res. Planets* **126** e2021JE006934 (2021)
- McKay D S, Ming D W *Development Soil Sci.* **19** 449 (1990)
- Иванов А В, Назаров М А *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина* (4) 48 (2012)
- Li C et al. *Natl. Sci. Rev.* **9** (2) nwab188 (2022)
- Harpe B, Sato H *Icarus* **273** 75 (2016)
- Науне P O et al. *J. Geophys. Res. Planets* **122** 2371 (2017)
- Леонтович А К, в сб. *Лунный грунт из Моря Изобилия* (Отв. ред. А П Виноградов) (М.: Наука, 1974) с. 563

55. Слюта Е Н *Астрон. вестник* **48** 358 (2016); Slyuta E N *Solar Syst. Res.* **48** 330 (2014)
56. Agrell S O et al., in *Proc. of the Apollo 11 Lunar Science Conf., 5–8 January, 1970, Houston, TX* Vol. 1 *Mineralogy and Petrology* (Ed. A A Levinson) (New York: Pergamon Press, 1970) p. 93
57. Loftus D J et al. *Earth Moon Planets* **107** 95 (2010)
58. Taylor L A, Cirlen E H, in *ESR Dating and Dosimetry* (Eds M Ikeya, T Miki) (Tokyo: IONICS, 1985) p. 19
59. Keller L P, McKay D S *Science* **261** 1305 (1993)
60. Keller L P, McKay D S *Geochim. Cosmochim. Acta* **61** 2331 (1997)
61. Pieters C M et al. *Meteorit. Planet. Sci.* **35** 1101 (2000)
62. Taylor L A et al. *J. Geophys. Res. Planets* **106** 27985 (2001)
63. Morris R V, in *Lunar and Planetary Science Conf., 9th, Houston, Tex., March 13–17, 1978, Proc.* Vol. 2 (New York: Pergamon Press, 1978) p. 2287
64. Guo Z et al. *Geophys. Res. Lett.* **49** e2021GL097323 (2022)
65. Lu X et al. *Nat. Astron.* **7** 142 (2023)
66. McKay D S et al., in *The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon* (Eds G H Heiken, D T Vaniman, B M French) (New York: Cambridge Univ. Press, 1991) p. 285
67. Fa W et al., in *50th Lunar and Planetary Science Conf., 18–22 March, 2019, Woodlands, Texas* (LPI Contrib., No. 2132) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2019)
68. Carrier W D (III) *The Moon* **6** 250 (1973)
69. Родэ О Д, Иванов А В *Астрон. вестник* **18** (1) 3 (1984); Rode O D, Ivanov A V *Solar Syst. Res.* **18** 1 (1984)
70. Park J S et al., in *37th Lunar and Planetary Sciences Conf., March 13–17, 2006, League City, Texas* (New York: Pergamon Press, 2006) p. 2193
71. Колмогоров А Н *ДАН СССР* **31** 99 (1941)
72. Адушкин В В и др. *Докл. РАН* **415** 247 (2007); Adushkin V V et al. *Dokl. Earth Sci.* **415** 820 (2007)
73. Попель С И и др. *Астрон. вестник* **47** 455 (2013); Popel S I et al. *Solar Syst. Res.* **47** 419 (2013)
74. Liu Y et al. *J. Aerospace Eng.* **21** 272 (2008)
75. Mahmood A et al., in *Proc. of the 5th Lunar and Planetary Sciences Conf.* (New York: Pergamon Press, 1974) p. 2347
76. Vaniman D et al., in *The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon* (Eds G H Heiken, D T Vaniman, B M French) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991) p. 27
77. Alvarez R "Lunar and terrestrial sample photoconductivity", in *Proc. of the Sixth Lunar Science Conf., Houston, Texas, March 17–21, 1975* Vol. 3 (New York: Pergamon Press, 1975) p. 3187
78. Halekas J S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **106** 27841 (2001)
79. Lin R P et al. *Science* **281** 1480 (1998)
80. Вышлов А С, Савич Н А *Космические исследования* **16** 551 (1978); Vyshlov A S, Savich N A *Cosmic Res.* **16** 450 (1979)
81. Васильев М Б и др. *Космические исследования* **12** 115 (1974); Vasil'ev M B et al. *Cosmic Res.* **12** 102 (1974)
82. Vyshlov A S, in *Space Research XVI; Proc. of the Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences, May 29–June 7, 1975, and Symp. and Workshop on Results from Coordinated Upper Atmosphere Measurement Programs, Varna, Bulgaria, May 29–31, 1975* (Berlin: Akademie-Verlag GmbH, 1976) p. 945
83. Imamura T et al. *J. Geophys. Res.* **117** A06303 (2012)
84. Stern S A *Rev. Geophys.* **37** 453 (1999)
85. Stubbs T J et al. *Planet. Space Sci.* **59** 1659 (2011)
86. Reasoner D L, Burke W J, in *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space. Proc. of the 6th ESLAB Symp., Noordwijk, September 26–29, 1972* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 37, Ed. R J L Grard) (Dordrecht: Reidel, 1973) p. 369
87. Vondrak R R, in *The Second Conf. on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* (NASA Conf. Publ. 3166, Vol. 1, Ed. W W Mendell) (Washington, DC: NASA, 1988) p. 337
88. Hodges R R, Hoffman J H, in *Proc. of the Sixth Lunar Science Conf., Houston, Texas, March 17–21, 1975* (New York: Pergamon Press, 1975) p. 3039
89. Hoffman J H, Hodges R R (Jr.), Evans D E, in *Proc. of the 4th Lunar and Planetary Sciences Conf.* (New York: Pergamon Press, 1973) p. 2875
90. Vondrak R R *Nature* **248** 657 (1974)
91. Potter A E, Morgan T H *Science* **241** 675 (1988)
92. Tyler A L et al. *Geophys. Res. Lett.* **15** 1141 (1988)
93. Попель С И и др. *Письма в ЖЭТФ* **105** 594 (2017); Popel S I et al. *JETP Lett.* **105** 635 (2017)
94. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966) с. 458; Пер. на англ. яз.: Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Mineola, NY: Dover Publ., 2002)
95. Альперт Я Л, Гуревич А В, Питаевский Л П *УФН* **79** 23 (1963); Al'pert Ya L, Gurevich A V, Pitaevskii L P *Sov. Phys. Usp.* **6** 13 (1963)
96. Lue C et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **123** 5289 (2018)
97. Feuerbacher B et al. *Geochim. Cosmochim. Acta* **3** 2655 (1972)
98. Willis R F, in *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, Proc. of the 6th ESLAB Symp., Noordwijk, September 26–29, 1972* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 37, Ed. R J L Grard) (Dordrecht: Reidel, 1973) p. 389
99. Walbridge E J. *Geophys. Res.* **78** 3668 (1973)
100. Sternovsky Z et al. *J. Geophys. Res.* **113** A10104 (2008)
101. Vondrak R R, private communication (2012)
102. Popel S I et al. *J. Plasma Phys.* **79** 1071 (2013)
103. Popel S I, Golub' A, Zelenyi L *Eur. Phys. J. D* **68** 245 (2014)
104. Chamberlin P C, Woods T N, Eparvier F G *Space Weather* **5** S07005 (2007)
105. Nitter T, Havnes O, Melandsø F J. *Geophys. Res.* **103** 6605 (1998)
106. Лисин Е А и др. *Письма в ЖЭТФ* **98** 755 (2013); Lisin E A et al. *JETP Lett.* **98** 664 (2013)
107. Mishra S K *Phys. Plasmas* **27** 082906 (2020)
108. Fowler R H *Statistical Mechanics: The Theory of the Properties of Matter in Equilibrium* (London: Cambridge Univ. Press, 1955)
109. Sodha M S, Dixit A, Srivastava S *Appl. Phys. Lett.* **94** 251501 (2009)
110. Bhardwaj A et al. *Geosci. Res.* **2** 10 (2015)
111. McComas D J et al. *Geophys. Res. Lett.* **36** L12104 (2009)
112. Wieser M et al. *Planet. Space Sci.* **57** 2132 (2009)
113. Saito Y et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L24205 (2008)
114. Katz I et al., Technical Report, NASA CR-135256, SSS-R-77-3367 (Washington, DC: National Technical Information Service, 1977)
115. Alussirat S T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **420** 33 (2018)
116. Sarantos M et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L04105 (2008)
117. McCracken G M *Rep. Prog. Phys.* **38** 241 (1975)
118. McGrath M A, Johnson R E, Lanzerotti L J *Nature* **323** 694 (1986)
119. Yokota S, Saito Y *Earth Planets Space* **57** (4) 281 (2005)
120. Baragiola R A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **88** 35 (1994)
121. Cladis J B, Francis W E, Vondrak R R *J. Geophys. Res.* **99** (A1) 53 (1994)
122. Manka R H, in *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, Proc. of the 6th ESLAB Symp., Noordwijk, September 26–29, 1972* (Astrophysics and Space Science Library, Ed. R J L Grard) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1973) p. 347, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2647-5_22
123. Freeman J W, Ibrahim M *The Moon* **8** 103 (1975)
124. Goldstein B E *J. Geophys. Res.* **79** (1) 23 (1974)
125. De B R, Criswell D R *J. Geophys. Res.* **82** 999 (1977)
126. Criswell D R, De B R *J. Geophys. Res.* **82** 1005 (1977)
127. Halekas J S et al. *Geophys. Res. Lett.* **29** 1435 (2002)
128. Halekas J S, Lin R P, Mitchell D L *Geophys. Res. Lett.* **32** L09102 (2005)
129. Halekas J S et al. *J. Geophys. Res.* **113** A09102 (2008)
130. Severny A B, Terez E I, Zvereva A M *The Moon* **14** 123 (1975)
131. Benson J J. *Geophys. Res.* **82** 1917 (1977)
132. Farrell W M et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L05105 (2008)
133. Попель С И, Зеленый Л М, Атаманюк Б *Физика плазмы* **42** 555 (2016); Popel S I, Zelenyi L M, Atamaniuk B *Plasma Phys. Rep.* **42** 543 (2016)
134. Anuar A K J. *Phys. Conf. Ser.* **852** 012001 (2017)
135. Order N C et al. *Adv. Space Res.* **62** 896 (2018)
136. Berezhnoy A A et al. *Planet. Space Sci.* **177** 104689 (2019)
137. Li D et al. *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL089433 (2020)
138. Popel S I, Zelenyi L M, Atamaniuk B *Phys. Plasmas* **22** 123701 (2015)
139. Farrell W M et al. *Geophys. Res. Lett.* **34** L14201 (2007)
140. Farrell W M et al. *J. Geophys. Res.* **115** E03004 (2010)

141. Poppe A R et al. *Icarus* **221** 135 (2012)
142. McCoy J E, Criswell D R, in *Lunar Science Conf., 5th, Houston, Tex., March 18–22, 1974, Proc.* (New York: Pergamon Press, 1974) p. 2991
143. Zook H A, Potter A E, Cooper B L "The Lunar Dust Exosphere and Clementine Lunar Horizon Glow", in *The Lunar and Planetary Science Conf.* Vol. 26 (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1995) p. 1577
144. Borisov N, Zakharov A *Planet. Space Sci.* **117** 295 (2015)
145. Hinteregger H E *Space Sci. Rev.* **4** 461 (1965)
146. Иванов-Холодный Г С, Фирсов В В *Геомагнетизм и аэронавтика* **14** 393 (1974); Ivanov-Kholodnyi G S, Firsov V V *Geomagn. Aeronomy* **14** 331 (1975)
147. Колесников Е К, Мануйлов А С *Астрон. журн.* **59** 996 (1982); Kolesnikov E K, Manuilov A S *Sov. Astron.* **26** 602 (1982)
148. Izvekova Yu N, Morozova T I, Popel S I *IEEE Trans. Plasma Sci.* **46** 731 (2017)
149. Морозова Т И, Попель С И *Физика плазмы* **43** 474 (2017); Popel S I, Morozova T I *Plasma Phys. Rep.* **43** 566 (2017)
150. Horányi M et al., in *Lunar Dust 2020* (LPI Contrib., No. 2141) (2020)
151. Singer S F, Walker E H *Icarus* **1** (2) 112 (1962)
152. Flanagan T M, Goree J *Phys. Plasmas* **13** 123504 (2006)
153. Sheridan T E, Hayes A *Appl. Phys. Lett.* **98** 091501 (2011)
154. Wang X et al. *Geophys. Res. Lett.* **43** 6103 (2016)
155. Rosenfeld E V, Zakharov A V *Icarus* **338** 113538 (2020)
156. Hamaker H C *Physica* **4** 1058 (1937)
157. Li Q, Rudolph V, Peukert W *Powder Technol.* **161** 248 (2006)
158. Walch B, Horanyi M, Robertson S *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** (2) 97 (1994)
159. Sheridan T E et al. *J. Geophys. Res.* **97** 2935 (1992)
160. Sheridan T E *J. Appl. Phys.* **113** 143304 (2013)
161. Rosenfeld E V, Zakharov A V, Djakin V V *Langmuir* **38** 9382 (2022)
162. Hasani M et al. *J. Phys. D* **56** 025202 (2023)
163. Karlstrom K, Jonsson B, Preprint Lund Univ. (Lund: Lund Univ., 2013)
164. Rosenfeld E V et al. *Adv. Space Res.* **58** 560 (2016)
165. Dyal P et al. *Rev. Geophys.* **12** 568 (1974)
166. Mitchell D L et al. *Icarus* **194** 401 (2008)
167. Tsunakawa H et al. *Space Sci. Rev.* **154** 219 (2010)
168. Halekas J S et al. *Planet. Space Sci.* **56** 941 (2008)
169. Futaana Y et al. *Planet. Space Sci.* **54** 32 (2006)
170. Wieser M et al. *Geophys. Res. Lett.* **37** L05103 (2010)
171. Bamford R A et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 081101 (2012)
172. Вайсберг О Л и др., в кн. *Плазменная гелиогеофизика Т. 1* (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 378
173. Harnett E M, Winglee R M *J. Geophys. Res.* **107** 1421 (2002)
174. Blewett D T et al. *J. Geophys. Res.* **116** E02002 (2011)
175. Kramer G Y et al. *J. Geophys. Res.* **116** E00G04 (2011)
176. Garrick-Bethell I, Head J W (III), Pieters C M *Icarus* **212** 480 (2011)
177. Harada Y *Interactions of Earth's Magnetotail Plasma with the Surface, Plasma, and Magnetic Anomalies of the Moon* (Springer Theses) (Tokyo: Springer, 2015) Doctoral Thesis, <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55084-6>
178. Popel S I et al. *Phys. Plasmas* **29** 013701 (2022)
179. Gaier J R, in *The Impact of Lunar Dust on Human Exploration, held 11–13 February, 2020, Houston, Texas* (LPI Contrib. No. 2141) (Houston, TX: LPI, 2020) id. 5002
180. Murphy T W (Jr.) et al. *Icarus* **211** 1103 (2011)
181. Carroll W F, Blair P M (Jr.), in *Analysis of Surveyor 3 Material and Photographs Returned by Apollo 12* (NASA SP-284) (Washington, DC: NASA, 1972) p. 23
182. Milwitzky B (Ed.) "Analysis of Surveyor 3 material and photographs returned by Apollo 12", NASA Report 1972 (Washington, DC: NASA, 1972)
183. O'Brien B J, Gaier J R, Indicative Basic Issues about Lunar Dust in the Lunar Environment. White Paper for the National Academies Planetary Sciences Decadal Survey (2009)
184. Christoffersen R et al., NASA/TP 2009-214786 (Hanover, MD: NASA Center for AeroSpace Information, 2009)
185. Afshar-Mohajer N et al. *Adv. Space Res.* **56** 1222 (2015)
186. Slyuta E N et al. *Acta Astronautica* **187** 447 (2021)
187. Fortov V E et al. *Phys. Lett. A* **267** 179 (2000)
188. Robinson M et al. *Nature* **413** 396 (2001)
189. Thomas N et al. *Science* **347** aaa0440 (2015)
190. Smith B A et al. *Science* **215** 504 (1982)
191. Зеленый Л М и др., в кн. *Вклад академической науки в развитие космической отрасли. Научные сессии Общего собрания членов РАН и общих собраний отделений РАН, апрель, 2021 г.* (Под ред. А М Сергеева, В Г Бондура, А А Маковского) (М.: РАН, 2022) с. 157
192. Mitrofanov I G et al. *Science* **330** 483 (2010)
193. Кузнецов И А и др. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина* (4) 20 (2016); Пер. на англ. яз.: Kuznetsov I A et al. *Solar Syst. Res.* **51** 611 (2017)
194. Захаров А В и др. *Астрон. вестник* **55** 589 (2021); Zakharov A V et al. *Solar Syst. Res.* **55** 576 (2021)
195. Kuznetsov I A et al. *Planet. Space Sci.* **156** 62 (2018)

Physical processes of formation and features of the plasma–dust exosphere of the Moon

L.M. Zelenyi^(1,a), A.V. Zakharov^(1,b), S.I. Popel^(1,2,c), I.A. Kuznetsov^(1,d), E.V. Rosenfeld^(3,e)

⁽¹⁾ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ HSE University, ul. Myasnitskaya 20, 101000 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

ul. S. Kovalevskoi 18, 620108 Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: ^(a) lzelenyi@cosmos.ru, ^(b) zakharov@cosmos.ru, ^(c) popel@iki.rssi.ru, ^(d) kia@cosmos.ru, ^(e) evrosenfeld@gmail.com

We review studies of physical processes associated with the impact of external factors in outer space — flows of micrometeoroids and solar radiation — on the lunar regolith. Under the influence of these factors, regolith microparticles can detach from the surface and levitate. Near-surface plasma and levitating dust particles form a plasma–dust exosphere of the Moon. Under anthropogenic effects on the lunar environment, charged levitating microparticles can have an extremely negative impact on the engineering systems of lunar landers and on the activity and health of astronauts on the Moon. Based on information gained by automated and manned lunar missions and in laboratory experiments, we discuss modern ideas about physical processes occurring near the Moon's surface. Unsolved problems associated with the plasma–dust exosphere of the Moon are considered, and the principal strategies for their solution are outlined.

Keywords: Moon, plasma, lunar dust, solar wind, micrometeoroids, regolith, exosphere

PACS numbers: 52.27.Lw, **96.12. – a**, **96.20. – n**

Bibliography — 195 references

Received 17 July 2023, revised 18 September 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (6) 569 – 599 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (6) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.09.039567>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.09.039567>