

# Лунная пыль

Доктор  
физико-математических наук

**С.И. Попель,**

Институт космических исследований РАН

Есть ли на Луне пыль? Что говорили об этом Азимов, Кларк, Сергей Королев? Что показал эксперимент? А есть ли пыль вокруг Луны?

*Вернувшись на корабль, затолкал свой скафандр в контейнер и припоминаю теперь, что он весь был покрыт тонкой пылью. Какой-то странной пылью, на ощупь сухой и мелкой, как соль; ее трудно было стереть с рук.*

Станислав Лем. Мир на Земле

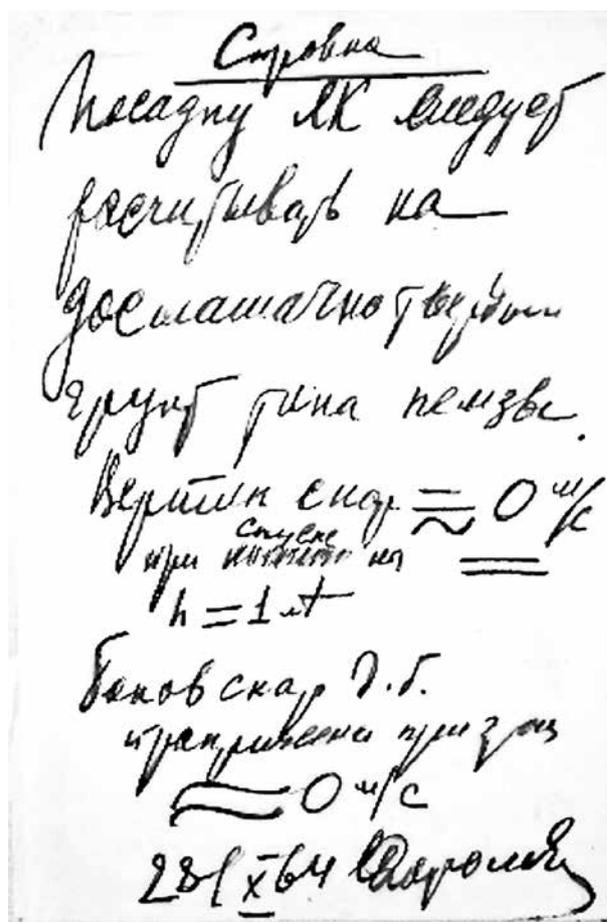
## Вокруг — не совсем вакуум

Не так давно человечество отметило 60-летний юбилей начала космической эры — 4 октября 1957 года был запущен первый советский искусственный спутник Земли. После этого многие интеллектуалы начали размышлять о предстоящих лунных миссиях. В 1959 году американский фантаст и популяризатор науки Айзек Азимов опубликовал научно-популярную статью «14 Million Tons of Dust Per Year» в журнале «Science Digest». Хотя «14 миллионов тонн» относились к количеству пыли, падающей на всю поверхность Земли за год, эти данные позволили оценить ожидаемую толщину слоя пыли на лунной поверхности в несколько десятков метров. Основываясь на этих предположениях, британский фантаст Артур Кларк в 1961 году написал научно-фантастический роман «Лунная пыль». Согласно сюжету романа, на Луне, покрытой очень толстым слоем пыли, между поселениями курсируют специальные корабли-пылеходы.

Проекты долговременного лунного поселения разрабатывали в СССР примерно с 1960 года в конструкторском бюро общего машиностроения под руководством В.П. Бармина. Идею создания таких поселений выдвинул С.П. Королев, а за образец приняли модули, используемые при устройстве станций в Антарктиде. Часть специалистов предполагала, что пылевой слой поглотит любой прилунившийся аппарат, а



1  
Экспедиция «Аполло-17». Харрисон Шмитт собирает частицы лунного грунта. Нижняя часть скафандра покрыта пылью

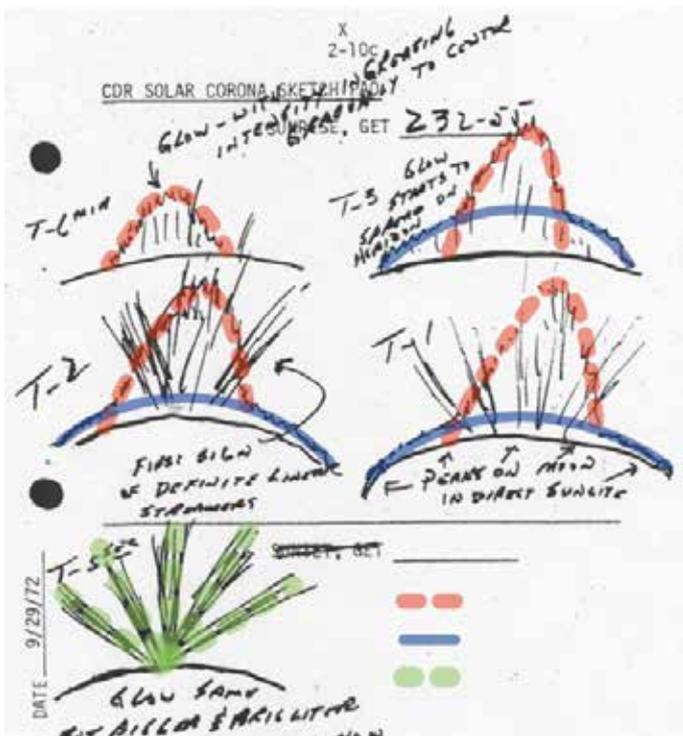


## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

тем более постройку. Существует легенда, что бесконечным спорам по этому поводу положил конец сам С.П. Королев. На одном из совещаний он написал в блокноте: «Луна — твердая. С. Королев», поставил дату, расписался и вручил листок с «резолуцией» своему оппоненту. Легенда легендой, но сохранилась его записка с примерно таким — по смыслу — текстом.

Королев оказался прав. Уже в 1966 году советская автоматическая станция «Луна-9», сконструированная с учетом предположения о достаточно твердом лунном грунте (типа пемзы), совершила посадку на ее поверхность. Американские астронавты, побывавшие на Луне в 1969—1972 годах, выяснили, что слой пыли на лунной поверхности не превышает нескольких сантиметров или десятков сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам астронавтов (рис. 1), поверхностям космических аппаратов, приборам и устройствам. На поверхности приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения, это может повлечь перегрев; возможны и другие неприятности. На скафандрах пыль заносится внутрь лунного модуля, и весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты будут вдыхать ее частицы, взвешенные в воздухе в состоянии невесомости. Таким образом, лунная пыль — существенный фактор риска и для здоровья астронавтов.

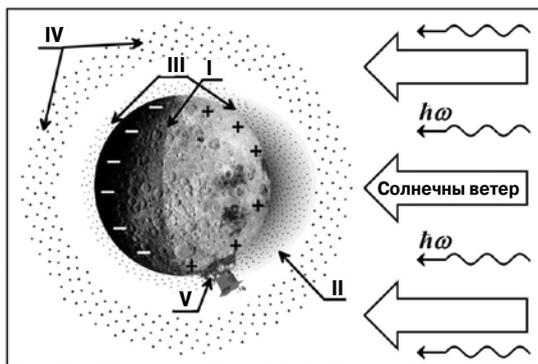
Во время космических миссий кораблей «Аполло» к Луне было замечено, что солнечный свет рассеивается в области терминатора: зоны между «днем» и «ночью». Это, в свою очередь, приводит к формированию лунных зорь («lunar horizon glow») и стримеров над лунной поверхностью (рис. 2). Последующие наблюдения показали, что рассеяние света, скорее всего, происходит на заряженных частицах пыли, источником которых служит поверхность Луны. Данные спускаемых космических аппаратов «Surveyor» позволили



2  
Зарисовка восхода на Луне (вид с лунной орбиты на космическом корабле «Аполло-17»), сделанная Юджином Сернаном. В правой части рисунка представлены источники рассеянного света: красным отмечено корональное и зодиакальное свечение; синим — лунные зори, обусловленные, возможно, пылью в лунной экзосфере; зеленым — стримеры — сумеречные лучи, формируемые затененным и рассеянным светом

сделать вывод, что микронные пылевые частицы могут парить приблизительно в 10—30 см от поверхности Луны. В миссиях «Аполло» проводились визуальные наблюдения с целью доказать существование субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до 100 км. Наличие субмикронной пыли над Луной подтверждают недавние наблюдения американского лунного орбитального аппарата LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer). Оказалось, что вокруг Луны, по крайней мере, на высоте от 1 до 260 км, непрерывно присутствует пылевое облако.

Вообще говоря, вопреки имеющимся представлениям, пространство над Луной — не совсем вакуум. Имеется разреженная лунная атмосфера, включающая нейтральные атомы и молекулы, ионы, электроны и заряженные пылевые частицы. Вот каковы, например, концентрации газов перед восходом Солнца (данные LACE, Lunar Atmospheric Composition Experiment): CO и CO<sub>2</sub> — 1·10<sup>3</sup> см<sup>-3</sup>, N<sub>2</sub> — 8·10<sup>2</sup> см<sup>-3</sup>, CH<sub>4</sub> — 1·10<sup>4</sup> см<sup>-3</sup>, а что касается



3  
Основные элементы плазменно-пылевой системы: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения, солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в Южной полусфере

инертных газов, то наличествует He — 2·10<sup>3</sup> см<sup>-3</sup> днем и 4·10<sup>4</sup> см<sup>-3</sup> ночью, и Ar — 1·10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup> днем и 4·10<sup>4</sup> см<sup>-3</sup> ночью.

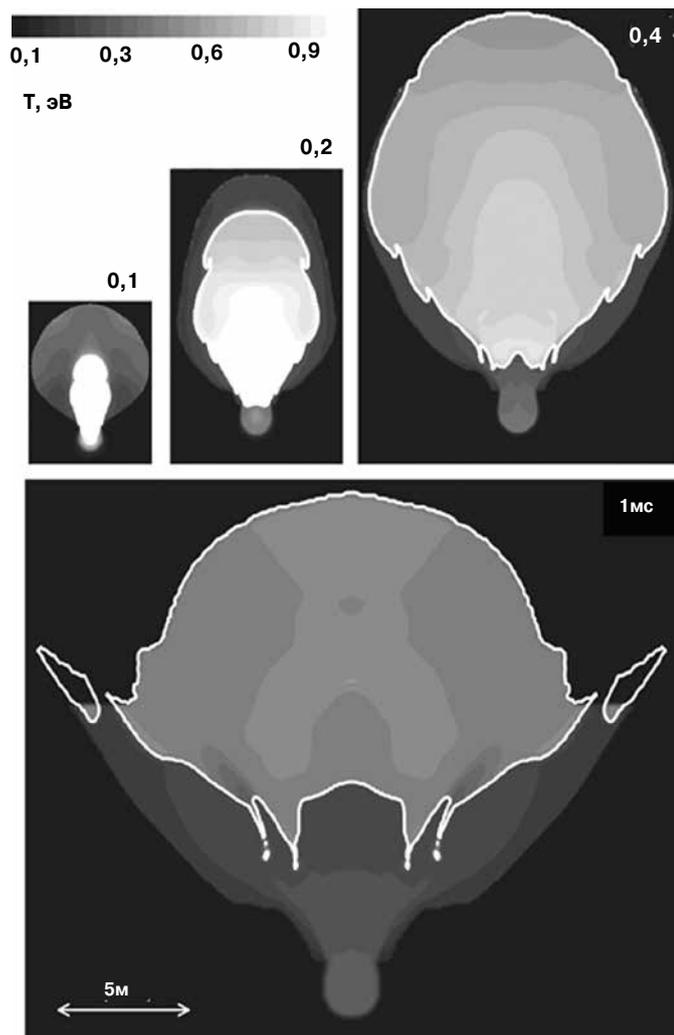
Принято считать, что пыль над лунной поверхностью живет не сама по себе, что она — составная часть плазменно-пылевой системы (рис. 3). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с излучением лунные породы испускают электроны благодаря фотоэффекту; кроме того, они поставляются и пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, которые тоже поглощают солнечный свет. Однако пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, не только испускают, но и поглощают фотоэлектроны, а также фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра; если же Луна находится в хвосте магнитосферы Земли — то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, перемещению и, возможно, подъему.

## Пыль и временные атмосферы

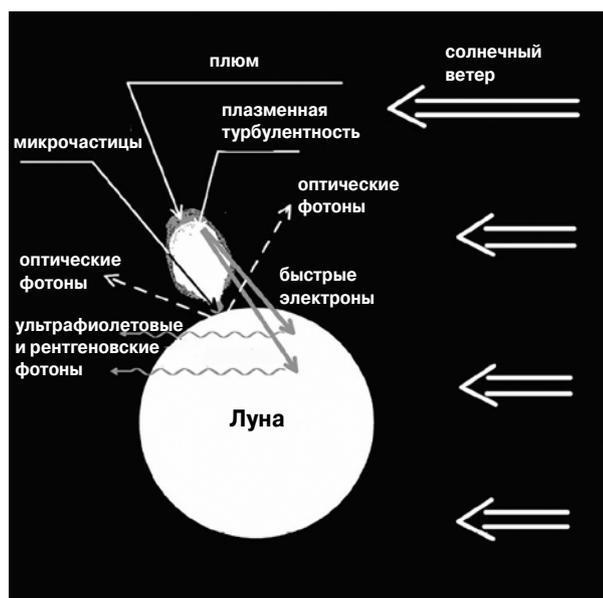
Важным источником пылевых частиц в пространстве над лунной поверхностью считаются так называемые временные атмосферы. У космических тел, не имеющих собственных атмосфер, таких как Луна, Меркурий и астероиды, эти атмосферы возникают из-за соударений с достаточно крупными метеороидами или космическими аппаратами. Такая временная атмосфера была обнаружена у поверхности Луны. Расчеты для метеороида размером 10 см, движущегося со скоростью 20 км/с, показывают, что при ударе такого метеороида о поверхность Луны образуется выброс, плюм (англ. plume — факел) из испаренного вещества, имеющий коническую форму (рис. 4). За 2,5 секунды высота плюма достигает 10 км, радиус — 5 км, а характерная плотность снижается до 10<sup>-15</sup> г/см<sup>3</sup>. После этого начинается бесстолкновительная фаза эволюции — свободный разлет атомов и молекул. При этом из-за солнечного ветра атомы и молекулы ионизируются и образуется плазма.

Кроме электронов, ионов и нейтралов в плазме плюма присутствуют микрочастицы. Первый тип частиц — мелкие капли, они создаются в результате конденсации при расширении вещества плюма, в них успевает собраться 20—30% вещества. Такие капли имеют приблизительно одинаковый размер — около 3 мкм и летят со скоростью 3—5 км/с. Это больше второй космической скорости для Луны (2,38 км/с), поэтому они покидают Луну и часть их долетает до Земли. Второй тип частиц — пыль — выбрасывается из воронки, образованной при соударении метеороида и слоя реголита (лунной породы). Типичный размер этих частиц 30 мкм, скорость 0,3—1 км/с. Если метеороид был размером 10 см, то получится около 4·10<sup>11</sup> частиц. Эти частицы не покидают Луну, при скорости 0,3 км/с они падают обратно за примерно 20 с; максимальная высота их подъема 3 км. Для такого метеороида плюм расширяется до 500 км — тогда плотности плазмы в плюме и плазмы солнечного ветра сравниваются, он сливается с космическим фоном. Это происходит через 250 с после столкновения.

При этом протекает множество других процессов (рис. 5). Возникает электромагнитное излучение, в частности, в оптическом диапазоне, которое при соударениях достаточно больших метеороидов может наблюдаться даже с поверхности Земли; формируется бесстолкновительный ударно-волновой фронт, связанный с возбуждением турбулентности в плазме плюма метеороида; межпланетное магнитное поле выталкивается из области плюма; идет образование микромасштабных частиц и их зарядка; передача энергии электронам, ускорение частиц в результате взаимодействия с плазменной турбулентностью; возникают ультрафиолето-



4  
Начальные стадии соударения метеороида с поверхностью Луны и процесса формирования плюма



5  
Процессы при соударении крупного метеороида с поверхностью Луны: оптические фотоны, возникающие при ударе; плюм метеороида и его эволюция; формирование микромасштабных частиц в плюме; плазменная турбулентность в области взаимодействия солнечного ветра с плюмом; генерация быстрых электронов, ультрафиолетовых и рентгеновских фотонов



## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

вое и рентгеновское излучение. Серьезные вычислительные модели эти процессы так или иначе учитывают.

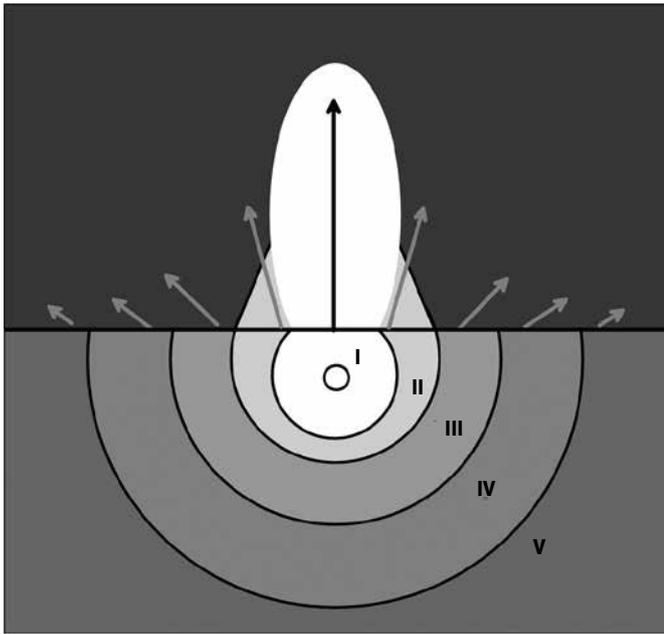
### Пылевое облако над Луной

Столкновения крупных метеороидов с Луной и формирование временной атмосферы, хотя и не очень редкие, но все же нерегулярные явления, они не могут сформировать постоянное плазменно-пылевое облако над Луной. А оно существует. Кроме данных LADEE имеется также ряд косвенных свидетельств. Например, советские аппараты «Луна-19» и «Луна-22» для определения концентрации электронов над Луной проводили радиозатменные измерения — изучали прохождение радиоволн через лунную экзосферу. Оказалось, что над освещенной солнечным излучением стороной Луны, на высоте от 10 до 30 км концентрация электронов составляет  $500\text{—}1000\text{ см}^{-3}$ . Эти величины согласуются с данными, полученными на основе радиозатменных измерений Крабовидной туманности, что говорит об их надежности.

Объяснить существование пылевого облака удастся, если учесть удары мелких метеороидов о поверхность Луны. Концентрация пылевых частиц в облаке определяется потоком частиц, образующихся в результате ударов метеороидов и поднимающихся над лунной поверхностью. Количество соударений с лунной поверхностью метеороидов размером  $10^{-5}$  см и более — порядка  $100\text{ м}^{-2}$  в сутки. Большинство ударников имеют субмикронный и микрометровый размер, их средняя скорость приблизительно равна  $27\text{ км/с}$ .

При соударении высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью происходит сильное сжатие и нагрев вещества ударника и мишени. Из-за высокого давления образуется сильная ударная волна, распространяющаяся от эпицентра удара и при этом ослабевающая. В итоге она трансформируется в линейную звуковую волну. Вокруг центра метеороидного взрыва, расположенного под поверхностью, формируются зона испарения вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), а также зона нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), характеризующаяся значениями давления в нелинейной звуковой волне, меньшими динамического предела упругости (рис. 6). За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная.

При распространении ударной волны вдоль лунной поверхности вдали от эпицентра метеороидного удара в приповерхностном слое формируется волна разрежения и появляется вертикальная компонента массовой скорости вещества за фронтом ударной волны, которая обычно с точностью до порядка величины совпадает с компонентой скорости, направленной вдоль поверхности. Вычисляя глубину откольного слоя, то есть слоя, в котором фрагменты с поверхности лунной породы отделяются в результате взаимодействия с волной сжатия, а также среднее значение потока метеороидов на поверхности Луны, можно найти



6  
 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) — невозмущенный метеороид. Стрелками показан выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны из зон I—V.

количество пылевых частиц, поднимающихся в единицу времени над единицей площади лунной поверхности вследствие ударов метеороидов.

Из разных зон происходит разное количество частиц, и ведут они себя по-разному. Например, масса частиц, происходящих из зоны V линейных упругих деформаций вещества реголита и поднимающихся над поверхностью Луны на высоту, более 10 м, превосходит массу поднимающегося вещества, происходящего из других зон (I—IV), в 80 раз. Масса пылевых частиц из зон IV и V упругих деформаций, поднимающихся над поверхностью Луны на высоты, большие 10 км, в четыре раза превосходит массу поднимающегося вещества из зон I—III. Зато только материал из зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), а также зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III) может достигнуть высоты 100 км над поверхностью Луны и выше. На 700 км поднимается лишь материал, выбрасываемый ударной волной из зоны испарения (I) и зоны плавления (II).

Важную роль при формировании пылевого облака над поверхностью Луны играет зона плавления вещества (II). Прежде всего, значительная доля частиц, образованных из вещества этой зоны, обладает скоростью, меньше второй космической скорости для Луны, то есть они не покидают ее навсегда, движутся по финитным траекториям и в итоге возвращаются на поверхность Луны. Кроме того, из-за фрагментации вещества из зоны плавления число частиц оказывается достаточно большим.

Процесс образования частиц из зоны плавления качественно выглядит так. В результате метеороидного удара пористый реголит сжимается ударной волной до плотностей сплошного вещества. Если при выходе ударной волны на свободную поверхность давление за фронтом волны оказывается больше порогового давления полного плавления, но при этом меньше порогового давления полного испарения, то материал оказывается полностью расплавленным (зона II). После выхода ударной волны на свободную поверхность оболочка выбрасывается в свободное пространство находящимся позади нее расширя-

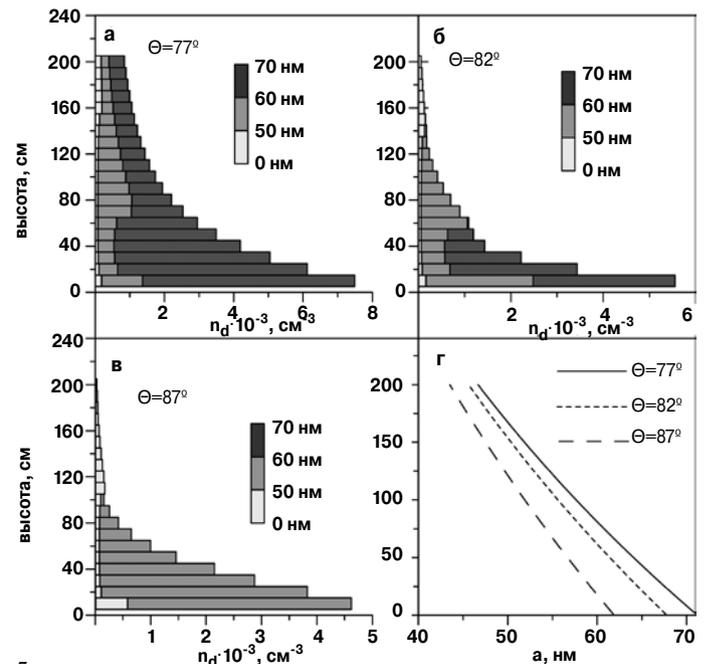
ющимся паром. Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты. Равновесные капли образуются, когда в капельно-паровом потоке объем, занимаемый паром, становится сопоставимым с объемом жидкости. Численная модель позволяет оценить концентрацию капель, и результат соответствует наблюдаемой в рамках миссии LADEE концентрации пылевых частиц в облаке. Поднимаясь над поверхностью Луны, жидкие капли расплава затвердевают и, взаимодействуя с электронами и ионами солнечного ветра, а также с солнечным излучением, приобретают электрические заряды.

Поскольку поток метеороидов (в том числе и микрометеороидов) на лунную поверхность есть всегда, пылевое облако над Луной существует непрерывно, что также соответствует данным LADEE. То, что пылевое облако образовано веществом, поднятым с поверхности Луны вследствие ударов метеороидов, объясняет обнаруженное миссией LADEE скачкообразное возрастание концентрации пыли во время взаимодействия некоторых из ежегодных метеорных потоков с Луной, в частности во время высокоскоростного метеорного потока Геминид.

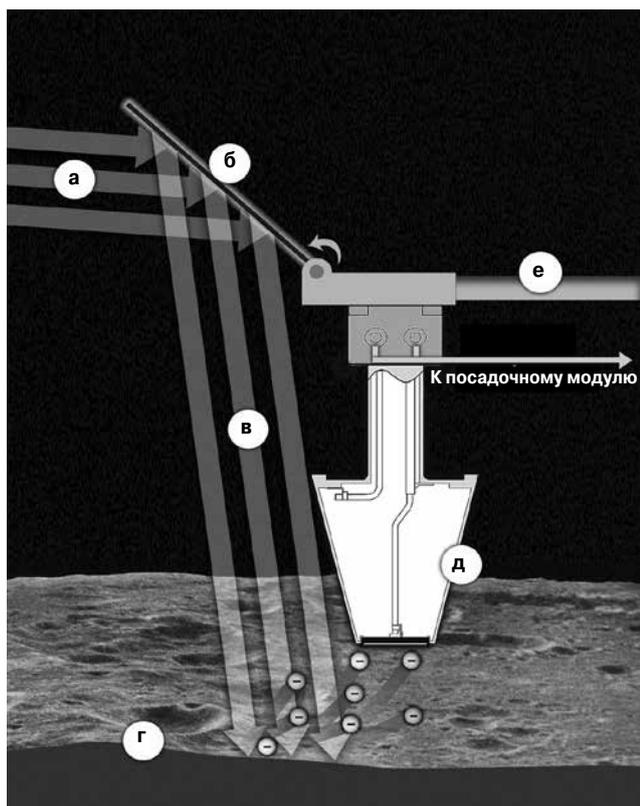
## Пыль над Луной

В будущих лунных исследованиях, на посадочных модулях станций «Луна-25» и «Луна-27» предполагается разместить аппаратуру, которая будет и непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, и проводить оптические измерения.

Пыль в приповерхностном слое над Луной имеет свои особенности. Прежде всего, там преобладают электростатические и плазменно-пылевые процессы. Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением и поверхностью Луны, и частицы пыли испускают электроны вследствие фотоэффекта, таким образом над поверхностью формируется слой фотоэлектронов. Но в то же время и пылевые частицы, и поверхность поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы



7  
 Распределения пылевых частиц над освещенной солнечным излучением частью поверхности Луны для углов  $77^\circ$  (а),  $82^\circ$  (б),  $87^\circ$  (в), а также максимально возможные значения высоты подъема пылевых частиц (z)



8

Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита: а — световой поток от источника излучения, б — зеркало, в — световой поток, преобразованный зеркалом, г — лунная поверхность, д — зонд Ленгмюра, е — штанга, на которой укреплено оборудование для измерений

плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Интерес к описанию плазменно-пылевой системы в окрестности Луны возрос в конце 1990-х годов, когда были разработаны методы исследования пылевой плазмы. Удалось, в частности, изучить плазменно-пылевую систему в приповерхностном слое освещенной части Луны, в том числе и в области высоких широт — предполагаемой зоне прилунения посадочных модулей станций «Луна-25» и «Луна-27».

Исследование освещенной части Луны важно для этих проектов, поскольку станции, питающиеся от солнечных батарей, будут работать в основном во время лунного дня. Представленные на рис. 7а — в гистограммы описывают расчеты концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов между местной нормалью и направлением на Солнце, равных  $77^\circ$ ,  $82^\circ$  и  $87^\circ$ . Видно, что поведение частиц сильно зависит от этого угла. На рис. 7г показано, до каких максимально возможных высот могут подняться пылевые частицы. Полученные данные опровергают выводы более ранних работ о существовании так называемой мертвой зоны, где пылевые частицы не поднимаются с поверхности, в области лунных широт около  $80^\circ$  — тех самых, где планируется прилунение станций.

При расчете параметров плазменно-пылевой системы важен квантовый выход лунного реголита, то есть количество электронов, выбиваемых с поверхности реголита одним фотоном. Имеющиеся данные пока недостаточно надежны. Так, даже при экспериментальных исследованиях частиц реголита, доставленных в миссиях «Apollo-14, 15», не было возможности работать с образцами, хранившимися до этого в высоком вакууме. Манипуляции с частицами проводили в инертной атмосфере, содержащей примеси. Поверхность образцов

подвергалась воздействию чужеродных веществ, ее квантовый выход и работа выхода могли измениться.

Эти параметры надо определить методами, исключаящими взаимодействие образцов с земным воздухом. Однако обеспечить доставку лунного грунта без контакта с земной атмосферой довольно сложно. Идеальным решением проблемы было бы проведение исследования непосредственно на Луне. Возможная схема эксперимента представлена на рис. 8. Источником электромагнитного излучения служит Солнце, для концентрации излучения используются зеркала. Правда, при этом несколько изменяется спектр излучения, но зато усиление его интенсивности позволит получить более надежные результаты. В качестве источника излучения можно было бы взять светодиоды или газоразрядную лампу, но их спектр отличается от солнечного гораздо сильнее. Для измерения параметров плазмы предлагается использовать зонд Ленгмюра, детектировать поток фотоэлектронов как при освещении источником света лунной поверхности, так и в его отсутствие, и регистрировать их энергетический спектр. Оборудование для этого эксперимента, возможно, будет размещено на спускаемом модуле станции «Луна-27» — на штанге, позволяющей отдалить его от посадочного модуля, — это снизит влияние фотоэлектронов, испускаемых модулем, на результаты. Для этой же цели предполагается покрасить части аппарата, прилегающие к штанге, красителем, уменьшающим генерацию фотоэлектронов.

## Снова на Луну

Нынче происходит определенный ренессанс исследований Луны — о планах исследования Луны в XXI веке заявили Европейский союз, Индия, КНР, США, Япония. В России готовятся миссии «Луна-25», «Луна-26» и «Луна-27». Завершились исследования в рамках миссии НАСА LADEE. Много внимания во всех программах уделено исследованиям лунной пыли. Если данные миссий 1960—1970-х годов позволяли судить лишь о присутствии пыли в экзосфере Луны, то современные миссии предполагают целенаправленное изучение свойств лунной пыли. Подготовка лунных миссий сопровождается соответствующими теоретическими исследованиями, часть результатов приведена выше. Остается дождаться данных, которые позволят усовершенствовать наши теории.

Исследования лунной пыли приобретают особую важность, если вспомнить о планах создания обитаемой лунной базы, которая обсуждается достаточно активно. Как написал астронавт миссии «Apollo-17» Харрисон Шмитт: «Пыль — это экологическая проблема номер один на Луне». Она явно не полезна, особенно при попадании в легкие. В экспедициях 1960—1970-х годов контакт с лунной пылью был коротким, но, когда будут создаваться долговременные базы, проблему пыли придется решать, чтобы избежать серьезных проблем со здоровьем участников экспедиции. Да и аппаратуре эта пыль вряд ли будет полезна.

