

Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе

С.И.Попель

Трудно представить себе заполненную плазмой область Солнечной системы, свободную от мелкодисперсных пылевых частиц. Нано- и микро-масштабные пылевые частицы обнаруживаются в межпланетном космическом пространстве, в плазме ионосфер и магнитосфер планет Солнечной системы, в планетарных кольцах, в окрестностях космических тел, не имеющих собственной атмосферы — таких как Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др. Пожалуй, есть лишь одно исключение из этого правила — собственно Солнце и область в непосредственной близости от него, где из-за высоких температур пыль существовать не может. Рассеяние солнечного излучения на частицах межпланетной пыли формирует F-компоненту спектра солнечной короны.

В результате взаимодействия с электронами и ионами окружающей плазмы, а также под действием солнечного излучения пылевые частицы приобретают электрический заряд и становятся одним из важных компонентов среды, существенно влияющим на ее свойства и динамику [1]. Плазму, содержащую электроны, ионы, нейтральные частицы, а также заряженные твердые частицы и/или жидкие капли, которые либо самопроизвольно образуются в плазме в результате различных процессов, либо вводятся туда извне,



Сергей Игоревич Попель, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах ИКИ РАН. Область научных интересов — космическая плазма, комплексная (пылевая) плазма, нано- и микроструктурные объекты и пыль в природе, явления самоорганизации, волновые процессы, сильные возмущения в природе и лаборатории, включая ударные волны.

принято называть пылевой. Для обозначения плазменно-пылевых систем пользуются и другими терминами: «комплексная плазма», «коллоидная плазма», «плазма с конденсированной дисперсной фазой», а также «плазма мелкодисперсных частиц». Первые два наименования употребляются наиболее часто. Применительно к космической плазме, которая содержит заряженные пылевые частицы, приводящие к тем или иным физическим и/или динамическим последствиям, в основном употребляют понятие «пылевая плазма».

Что интересно и почему?

В планетологии нано- и микро-размерные компоненты выступают в качестве основных элементов структуры космических тел, поэтому исследования природных нано- и микро-размерных пылевых объектов могут привести к расширению наших представлений о фундаментальных процессах геологии и планетообразования [2]. Так, например, протопланетная пыль имеет размеры от 10 нм до 150 нм. Она относится к хондритам класса C1. Если проанализировать состав углистых хондритов, получаются минералы, входящие в состав мантии Земли. Можно сделать вывод, что по крайней мере планеты земной группы произошли из наномасштабных частиц, состав которых отвечает углистым хондритам. Есть серьезные аргументы в пользу предположения, что Солнечная система в свое время сформировалась из плазмы, содержащей заряженные пылевые частицы [3]. Таким образом, изучение мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой

плазмы в Солнечной системе, ионосферах и магнитосферах Земли и других планет может дать новую информацию о межзвездном веществе, механизмах планетообразования и т.д.

Интерес к описанию пылевой космической плазмы резко возрос в конце 1990-х годов, что было связано с разработкой к тому времени теоретических методов исследования пылевой плазмы, в том числе и в природных системах [1]. Важная ее особенность — быстрая зарядка пылевых частиц, идущая за счет ряда процессов, среди которых можно выделить рекомбинацию электронов и ионов на поверхности пылевых частиц, фотоэффект и др. Наличие заряженной пыли существенно сказывается на коллективных процессах, т.е. процессах, связанных с наличием колебаний или шумов конечной амплитуды (взаимодействие которых с частицами заметно влияет на макроскопические свойства плазмы), на процессах самоорганизации в среде, а также на ее диссипативных свойствах. Присутствие массивных (по сравнению с ионами и электронами) заряженных пылевых частиц изменяет характерные пространственные и временные масштабы в плазме, а в ряде ситуаций даже порождает новую физику тех или иных явлений. Изменяемость (в зависимости от текущих параметров плазмы) зарядов пылевых частиц модифицирует спектры волн, распространяющихся в среде, влияет на эффекты затухания волн, определяет характер развития неустойчивостей и нелинейных процессов и т.д. Процессы самоорганизации в пылевой плазме приводят к формированию капель, облаков, разного рода структур, плазменно-пылевых кристаллов и т.д.

В последние годы существенно усилился интерес и к непосредственному изучению космических пылевых частиц. Была организована миссия НАСА «Stardust» («Звездная пыль»), одна из основных целей которой — сбор и доставка на Землю частиц из окрестностей ядра кометы 81P/Wild 2 — была успешно реализована 15 января 2006 г., когда капсула с образцами кометного вещества вернулась на Землю [4]. В недавней американской миссии LADEE («Lunar Atmosphere and Dust

Environment Explorer» — «Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») [5] лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты. В России готовятся миссии «Луна-25» и «Луна-27». На посадочных модулях станций «Луна-25 и -27» предполагается разместить аппаратуру [6], которая будет исследовать свойства пылевой плазмы над поверхностью Луны (рис.1). Посадка спускаемых аппаратов планируется в области высоких широт в южной полушфере Луны, что существенным образом отличает эти миссии от всех более ранних миссий, когда прилунения осуществлялись недалеко от экватора.

Поэтому, рассказывая о свойствах пыли/пылевой плазмы в пространстве вокруг Солнца, особое внимание уделим ее состоянию над поверхностью Луны, важному для успешного осуществления экспериментов в рамках будущих проектов «Луна-25 и -27».

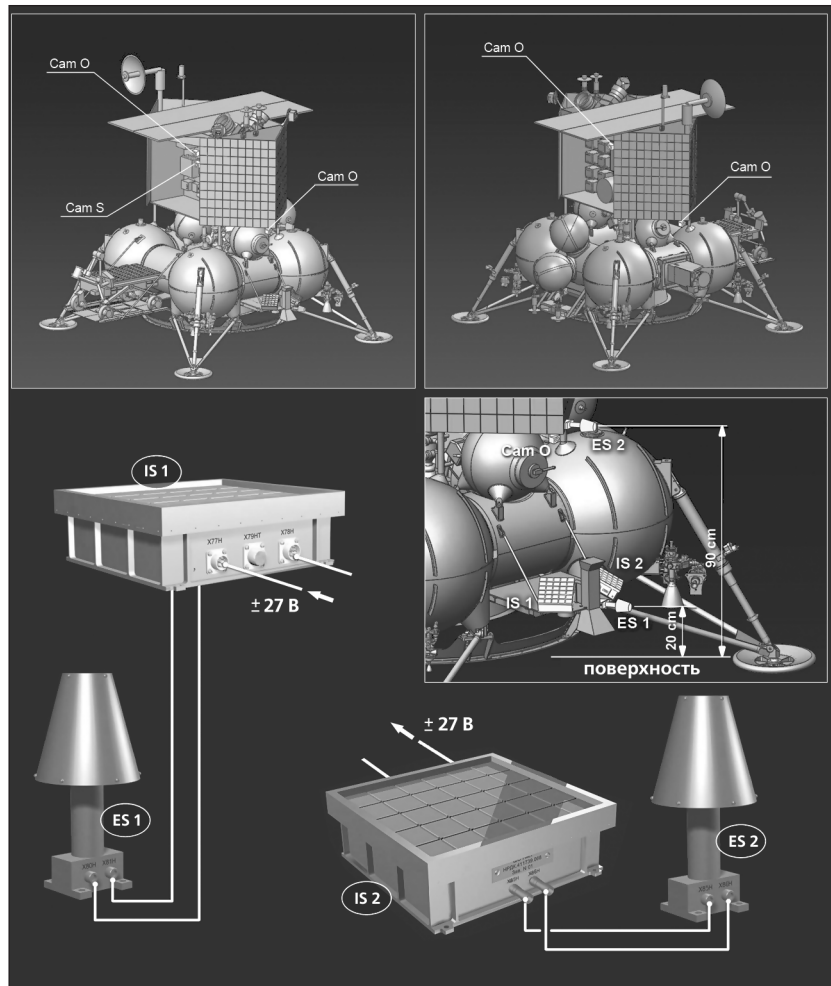


Рис.1. Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станциях «Луна-25 и -27». Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O).

Зодиакальное пылевое облако

Межпланетная пыль распределена по Солнечной системе неравномерно: основное ее количество концентрируется в плоскости эклиптики. Это скопление пыли, заполняющей межпланетное пространство между Землей и Солнцем, называется зодиакальным пылевым облаком. Содержание пыли в нем падает по мере удаления от Солнца и от плоскости эклиптики. Солнечное излучение, рассеиваясь на частицах этого облака, дает зодиакальный свет. На основе наблюдений последнего космическими зондами «Helios-1 и -2» на расстояниях от 0.3 до 1 а.е. до Солнца были выполнены измерения концентраций пыли n в зависимости от расстояний r до Солнца. Оказалось, что в плоскости эклиптики $n \propto r^{-1.3}$. Результаты наблюдений указывают на существенный вклад в зодиакальный свет на расстоянии 1 а.е. от Солнца рассеяния на микромасштабных частицах размерами 1–100 мкм [7].

Источником мелких частиц, заполняющих Солнечную систему, служат разрушающиеся ядра комет и столкновения тел в поясе астероидов. Самые мелкие частицы постепенно приближаются к Солнцу в результате эффекта Пойнтинга—Робертсона. Этот эффект заключается в том, что давление солнечного света на движущуюся частицу направлено не точно по линии Солнце—частица, а из-за абберации света отклонено назад по отношению к ее скорости и потому тормозит ее движение. Хотя пылевые частицы, как правило, и состоят из тугоплавких материалов, при приближении к Солнцу до расстояний в несколько солнечных радиусов R_{\odot} важным становится процесс сублимации. Он происходит на разных расстояниях от Солнца для частиц различных размеров, что обусловлено сильной зависимостью температуры частицы от ее размера. В результате сублимации при уменьшении радиуса частицы до ~500 нм относительные силы давления солнечного света к силе солнечной гравитации увеличивается. Увеличение этого отношения уравнивает силу дрейфа Пойнтинга—Робертсона, и, таким образом, происходит накопление субмикронных и микромасштабных частиц в зоне их сублимации. Вертикальная структура пылевого облака на расстояниях от Солнца, не превосходящих $10R_{\odot}$, имеет следующий вид [7]: частицы с размерами, превышающими 10 мкм, находятся в диске с типичной толщиной в десятки градусов; частицы размером не-

сколько микронных заполняют более широкий объем, имеющий также форму диска; субмикронные частицы формируют вокруг Солнца гало почти сферической формы с радиусом, большим $10R_{\odot}$.

Кометная пыль

Высвобождение пыли при разрушении ядер комет происходит следующим образом. Приближаясь к Солнцу, комета обычно приобретает характерную структуру: видимый гигантский хвост, ядро (как правило, невидимое) очень маленького размера по сравнению с хвостом, а также атмосферу, окружающую ядро, — ее называют комой кометы. Кома и хвост формируются как следствие истечения вещества из ядра кометы. В ядре ледяные слои из замороженных газов чередуются с пылевыми слоями. По мере прогревания солнечным излучением образующиеся в результате возгонки газы вытекают наружу, увлекая за собой облака пыли. В результате ядро кометы становится источником газопылевого потока, движущегося (вслед за ядром) навстречу солнечному ветру.

На рис.2 представлена фотография кометы Хейла—Боппа. На ней видны два хвоста, четко разделенные в плоскости неба. Верхний, направленный в противоположную от Солнца сторону, образуют главным образом увлекаемые солнечным ветром ионы CO^+ , которые и придают голубой оттенок цвету этого хвоста. В нижнем (белом) хвосте летят пылевые частицы размером около 1 мкм. Пыль из



Рис.2. Фотография кометы Хейла—Боппа, снятая 14 марта 1997 г. в Европейской южной обсерватории. Верхний хвост кометы состоит в основном из ионов CO^+ , нижний — из пылевых частиц размером ~1 мкм.

www.eso.org

Таблица

Размеры и плотности микрочастиц космической пыли

Радиус, см	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.44 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$2.04 \cdot 10^{-5}$	$2.98 \cdot 10^{-5}$	$4.51 \cdot 10^{-5}$	$6.63 \cdot 10^{-5}$	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$2.36 \cdot 10^{-4}$	$5.57 \cdot 10^{-4}$
Плотность, г/см ³	2.9	2.85	2.82	2.8	2.72	2.59	2.45	2.26	1.8	1.38

ядра и комы кометы отбрасывается назад силой светового давления Солнца. Однако из-за достаточно больших масс пылевых частиц на их движении существенным образом сказываются инерция и солнечная гравитация. Поэтому нижний (пылевой) хвост кометы отклонен в сторону от верхнего (ионного) хвоста. Во время съемки комета выделяла газа и пыли около 200 т в секунду.

Соотношение пыль/газ, характеризующее отношение масс тугоплавких и летучих компонент в ядре, которое было определено из наблюдений комы различных комет, находится в диапазоне от 0.1 до 1 [8]. Распределение пыли по размерам представляет собой степенную функцию размера частицы с показателем, близким к -4 [9]. На примере кометы Галлея в рамках проекта «Вега» было показано [10], что минимальный размер частиц в указанном распределении ~ 10 нм.

Исследования пылевых частиц вблизи кометы Галлея, а также частиц из микрократеров на Луне, потоков метеоров, межпланетных пылевых частиц, собранных космическими аппаратами, позволили получить [11] параметры, которые широко используются для исследования зарядки и динамики пылевых частиц в магнитосфере Земли и Солнечной системе (см., например, [9]). Размеры и плотности микромасштабных пылевых частиц по данным работы [11] приведены в таблице.

Впервые исследование частиц пыли кометного происхождения в земных условиях удалось провести в рамках уже упоминавшейся миссии «Stardust». Основной целью миссии был сбор кометной пыли с последующей доставкой образцов на Землю. На некоторых участках траектории космического аппарата «Stardust» собирались также образцы межпланетной пыли. Она захватывалась коллектором, заполненным аэрогелем и установленным на космическом аппарате. Когда последний находился в окрестностях ядра кометы 81P/Wild 2 (точка максимального сближения «Stardust» была примерно в 236 км от ядра), в коллекторе оседали пылевые частицы. Затем он был герметично закрыт и спрятан в возвращаемую капсулу, которая в январе 2006 г. вернулась на Землю. После вскрытия капсулы стало ясно: миссия выполнена успешно — аэрогель содержал крупные и мелкие частицы кометного вещества (рис.3). Исследование частиц показало, что их размеры варьировались от десятков нанометров до десятых долей миллиметра. В среднем они оказались крупнее частиц кометы Галлея.

Выводы, которые последовали после изучения образцов частиц, содержащихся в аэрогеле аппарата «Stardust», стали довольно неожиданными. Дело в том, что, хотя в настоящее время орбита кометы 81P/Wild 2 располагается между орбитами

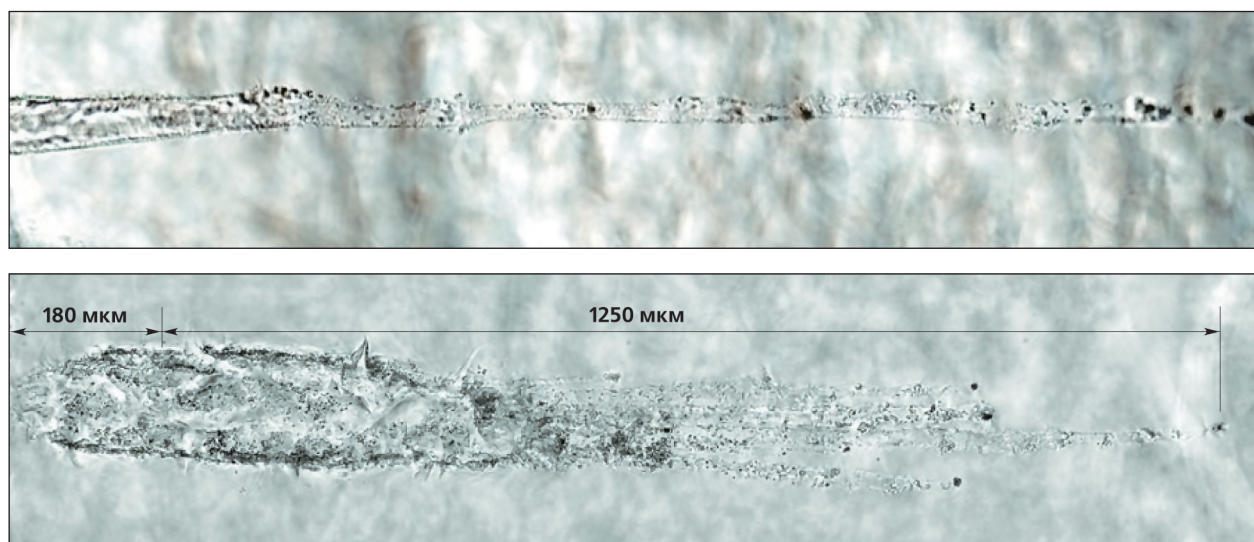


Рис.3. Фотографии треков от пылевых частиц кометного происхождения в аэрогеле аппарата «Stardust» [4]. Движение частиц происходило слева направо. На верхнем рисунке видно, что твердая частица перемещается без дальнейшей фрагментации. На нижнем рисунке изображена эволюция первоначально слабосвязанного скопления частиц, каждая из которых имеет размер в несколько микрометров.

Марса и Юпитера, согласно имеющимся представлениям, большую часть своей истории (продолжающейся около 4.5 млрд лет) эта комета имела более отдаленную орбиту и в основном странствовала за пределами орбиты Нептуна. В 1974 г. комета прошла вблизи Юпитера, мощное гравитационное поле которого изменило ее орбиту — перенесло ее во внутреннюю часть Солнечной системы. Таким образом, ожидалось, что частицы, собранные аппаратом «Stardust», должны представлять собой примеры твердого вещества с окраин Солнечной системы [4]. И действительно, исследование минералогического состава частиц показало: большая их часть состоит из явно холодного материала с дальней периферии. Однако около 10% сформировалось в условиях высоких температур (больших 1100°C)! Среди этих 10% — микрокристаллы оливина, состоящие из железа, марганца и других элементов, кристаллы осборнита, включающего в себя сернистый кальций и сернистый титан, и др. Как видно на примере этих данных, изучение свойств космических пылевых частиц ставит перед исследователями ряд вопросов о формировании исходного материала комет и в конечном итоге может внести уточнения в понимание процессов, происходивших при образовании Солнечной системы.

Ключевой момент взаимодействия солнечного ветра с комой кометы — формирование головной ударной волны. Оказывается, протоны солнечного ветра сильнее взаимодействуют с ионами кометы, чем заряженные и нейтральные частицы, содержащиеся в плазме комы кометы, между собой. Этот факт зачастую позволяет трактовать головную ударную волну как разновидность ионно-звуковой ударной волны. Присутствие заряженной пыли приводит к еще одному важному виду взаимодействия — взаимодействию протонов солнечного ветра с пылевыми частицами в коме кометы. Для типичного ядра кометы с радиусом ~1 км и для относительно плотной комы (с концентрацией пыли, превосходящей 10^6 см^{-3}) при формировании головной ударной волны важную роль играет аномальная диссипация, обусловленная зарядкой пылевых частиц [12]. Такая головная ударная волна, по-видимому, имеет природу, которая аналогична природе пылевых ионно-звуковых ударных волн, свойственных пылевой плазме.

Пыль в магнитосфере Земли

Несмотря на достигнутые успехи в изучении межпланетной пыли в рамках описанных выше удаленных миссий, основные исследования ее свойств все же проводятся по данным наблюдений в магнитосфере Земли. Элементарный состав пылевых частиц естественного происхождения в земной магнитосфере и микрометеороидов ча-

сто похож на состав углеродистых метеоритов хондритных классов C1 и C2 и включает в себя такие элементы, как Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni [13]. Вместе с тем часто встречающиеся среди частиц межпланетной пыли нано- и микромасштабные оливиновые скопления, а также сферулы металла (или его производных) диаметром от 100 нм до 500 нм, впаянные в силикатное стекло (так называемые частицы GEMS — Glass with Embedded Metal and Sulphides — стекло с включенными металлами и сульфидами), не наблюдались в качестве вещества микрометеороидов. Следует отметить, что определенная роль может принадлежать антропогенным частицам. На рис.4 приведена фотография, на которой изображена хондритная частица межпланетной пыли, прикрепленная к сферуле техногенного происхождения из оксида алюминия [14].

Приобрести заряд пылевые частицы в космосе могут различными путями. Что касается частиц межпланетной пыли, механизмы зарядки здесь — поглощение пылевыми частицами электронов и ионов окружающей плазмы, эмиссия электронов, вызванная электронным или ионным ударом, а также поглощением света (фотоэффект), и, наконец, столкновения пылевых частиц между собой. Основным эффектом, связанным с процессом зарядки пылевых частиц (и, как следствие, их

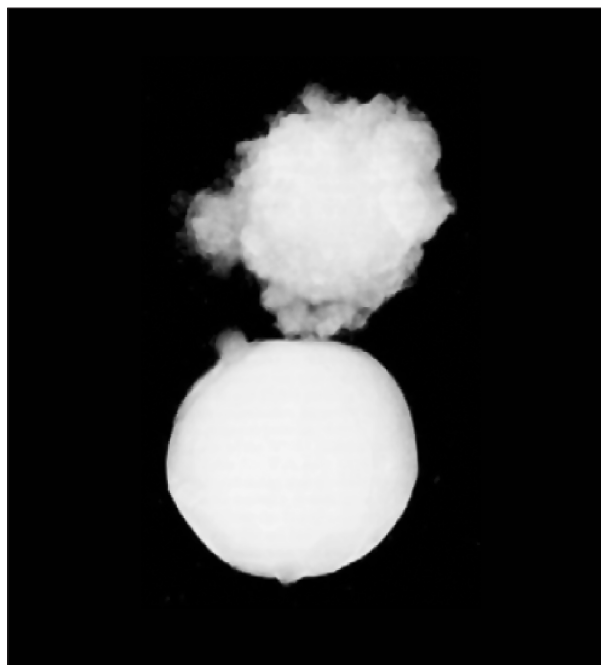


Рис.4. Фотография хондритной частицы межпланетной пыли (номер по каталогу «Johnson Space Center» U2015D8), прикрепленной к сферуле техногенного происхождения, которая состоит из оксида алюминия (U2015D9) [14]. Каждая частица имеет диаметр, приблизительно равный 6 мкм. Фотография доказывает, что частицы межпланетной пыли могут загрязняться техногенным веществом.

переменными зарядами), становится диффузия орбит пылевых частиц. Систематические вариации заряда, обусловленные градиентами параметров плазмы, а также модуляция токов плазмы, возникающая вследствие изменения скоростей пылевых частиц относительно потоков плазмы, могут приводить для разных условий к процессам переноса частиц внутри магнитосферы, выбросам частиц из нее, а также к захвату магнитосферой пылевых частиц из окружающего пространства. На процесс переноса пылевых частиц в магнитосфере может влиять также большая величина их заряда, достигающая $4 \cdot 10^5$ зарядов электрона. При этом продольная (вдоль магнитного поля) диффузия пылевых частиц способна существенно (в десятки раз) превосходить обычную диффузию броуновской частицы, тогда как диффузия поперек магнитного поля, как правило, проходит так же, как и в обычной замагниченной электронно-ионной плазме [13].

Лунная пыль

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на ее поверхности составляет несколько сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам (рис.5), поверхностям космических аппаратов, приборам и т.д., что может угрожать работе систем. Так, в частности, на поверхности приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения, что может привести к их перегреву. На скафандрах пыль заносится внутрь лунного модуля, и весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты могут вдыхать ее частицы, присутствующие в состоянии невесомости в воздухе. Таким образом, лунная пыль представляет собой существенный фактор риска и для здоровья астронавтов.

Во время космических миссий кораблей «Apollo» к Луне было замечено, что солнечный свет рассеивается в области терминатора, а это в свою очередь приводит к формированию лунных зорь и стримеров над поверхностью [15]. Последующие наблюдения показали, что рассеяние света наиболее вероятно происходит на заряженных пылевых частицах, источником которых служит поверхность Луны [16]. На основе данных спускаемых космических аппаратов «Surveyor» был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами около 5 мкм могут парить над поверхностью Луны приблизительно в 10 см от поверхности. В миссиях «Apollo» проводились наблюдения субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до примерно 100 км. Выводы о существовании пыли на больших высотах (от 30 до 110 км) можно сделать из недавних наблюдений лунного орбитального аппарата LADEE [5].



Рис.5. Астронавт «Apollo-17» Харрисон Шмитт собирает частицы лунного грунта. Нижняя часть его скафандра покрыта пылью.

В настоящее время фактически считается общепринятым [17, 18], что пыль над лунной поверхностью — составная часть плазменно-пылевой системы (рис.6). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с из-

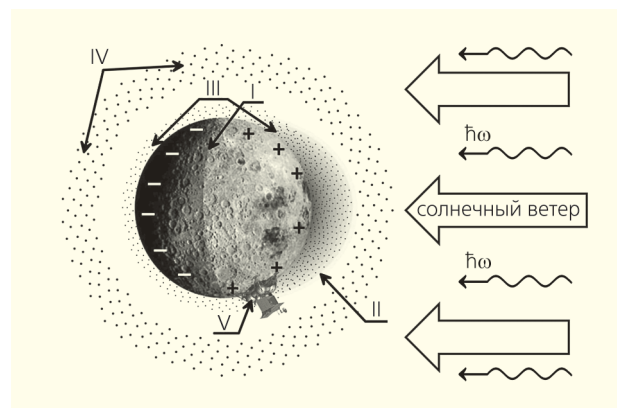


Рис.6. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ($h\nu$), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в южной полусфере.

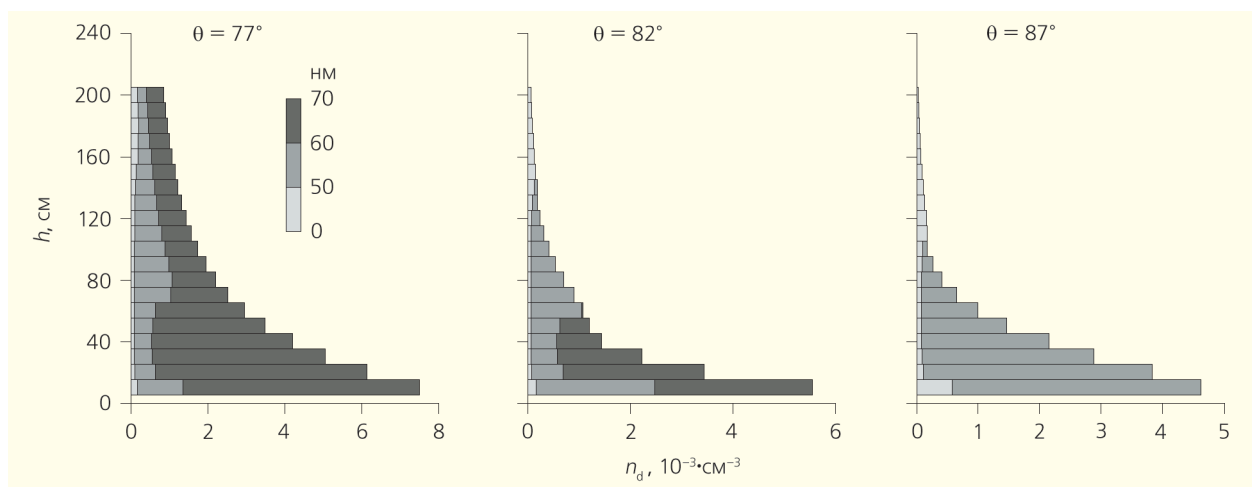


Рис.7. Распределения пылевых частиц над освещенной солнечным излучением частью поверхности Луны для значений $\theta = 77^\circ, 82^\circ, 87^\circ$. Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из графиков характеризует концентрацию частиц n_d (в см^{-3}) на соответствующих высотах h с размерами в интервале, указанном на шкале в верхней правой части первого графика. Общая длина горизонтального участка на графике отвечает полной концентрации частиц с представленными на нем размерами.

лучением лунные породы испускают электроны благодаря фотоэффекту, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. Фотоэлектроны поставляются и пылевыми частицами, парящими над поверхностью (они тоже поглощают солнечный свет). 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, подъему и движению пыли.

Данные [17], характеризующие распределения пылевых частиц в приповерхностном слое на освещенной части Луны над участками реголита, приведены на рис.7 и 8. Исследование освещенной части Луны чрезвычайно важно для понимания той картины, которую будут наблюдать в планируемых исследованиях в рамках проектов «Луна-25 и -27», поскольку работа автоматических станций, питающихся энергией от солнечных батарей, будет происходить в основном во время лунного дня. Представленные на рис.7 гистограммы описывают расчеты концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равных $77^\circ, 82^\circ$ и 87° . На рис.8 показано (тоже на основе вычислений), до каких максимально возможных высот могут подняться пылевые частицы различных размеров a и как распределяются по высоте зарядовые числа для различных значений угла θ . Наши данные опровергают вывод работы [18] о су-

ществовании мертвой зоны (в области лунных широт около 80°), где пылевые частицы не поднимаются над поверхностью. Именно указанная область широт и представляет интерес, поскольку, как уже отмечалось, прилуниться станции «Луна-25 и -27» должны будут в области высоких широт. Однако результаты, аналогичные тем, которые приведены на рис.7 для значений угла θ , равных $77^\circ, 82^\circ$ и 87° , можно получить и для других значений θ . Наклон оси Луны относительно плоскости эклиптики составляет всего 1.5424° , что определяет достаточно небольшое отличие лунной широты от угла θ . Таким образом, подъем пылевых частиц над поверхностью Луны возможен во всем диапазоне углов θ , и никакой мертвой зоны вблизи указанных широт, где частицы бы не поднимались вверх, нет. Отсутствие мертвой зоны связано с присутствием над лунной поверхностью фотоэлектронов.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в описании пыли и плазменно-пылевой системы в окрестностях Луны, следует отметить ряд важных вопросов, на которые еще предстоит получить ответы. Прежде всего, при расчетах параметров плазменно-пылевой системы весьма существенное значение имеет квантовый выход лунного реголита, т.е. количество электронов, выбиваемых одним фотоном с его поверхности. Имеющиеся данные по квантовому выходу лунной породы недостаточно надежны [6]. Так, например, даже при экспериментальных исследованиях частиц лунного реголита, доставленных в миссиях «Apollo-14, 15», не было возможности работать с образцами, хранившимися до этого в высоком вакууме. Манипуляции с частицами осуществлялись в инертной атмосфере, содержащей приме-

си. Таким образом, поверхность образцов лунного реголита подвергалась воздействию чужеродных веществ, и ее электрофизические свойства (в том числе квантовый выход и работа выхода, характеризующая минимальную энергию, которую надо сообщить электрону, чтобы тот покинул твердое тело) могли существенным образом измениться.

В связи с этим необходимо определить квантовый выход (и работу выхода) лунного реголита независимыми методами, исключая взаимодействие образцов с земным воздухом. Обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его контакта с земной атмосферой, довольно сложно. Решением проблемы было бы исследование квантового выхода и работы выхода породы, осуществленное с бортов посадочных модулей непосредственно на Луне. Возможная схема соответствующего эксперимента представлена на рис.9. Источником электромагнитного излучения служит Солнце, а для создания перенаправленного фотонного пучка используется оптический канал, состоящий из зеркал и/или оптического кабеля. Правда, наличие зеркал модифицирует спектр излучения. Это следует учесть при анализе окончательных результатов, но зато может помочь усилить (в несколько раз) интенсивность излучения, взаимодействующего с лунной поверхностью, что позволит получить более надежные результаты экспериментов. Конечно, в качестве источника излучения можно взять лазерные светодиоды, ртутную лампу и др. Однако при этом придется подбирать энергетический спектр излучателя в соответствии с солнечным, основываясь, например, на его максимумах. Предлагается использовать зонд Ленгмюра, который способен детектировать поток фотоэлектронов с шагом ~5 В в диапазоне от -100 до +100 В (как в случае освещения лунной поверхности источником света, так и в его отсутствие) и регистрировать их энергетический спектр. В свою очередь, последний коррелирует с вольт-амперной характеристикой зонда Ленгмюра. Сравнение вольт-амперных характеристик, полученных при освещении источником света лунной поверхности и без него, дает возможность определить квантовый выход и работу выхода лунного реголита. Оборудование для измерений этих характеристик предлагается разместить на спускаемом модуле станции «Луна-27» на штанге, позволяющей отдалить указанное оборудование от корпуса посадочного модуля, что необходимо для снижения

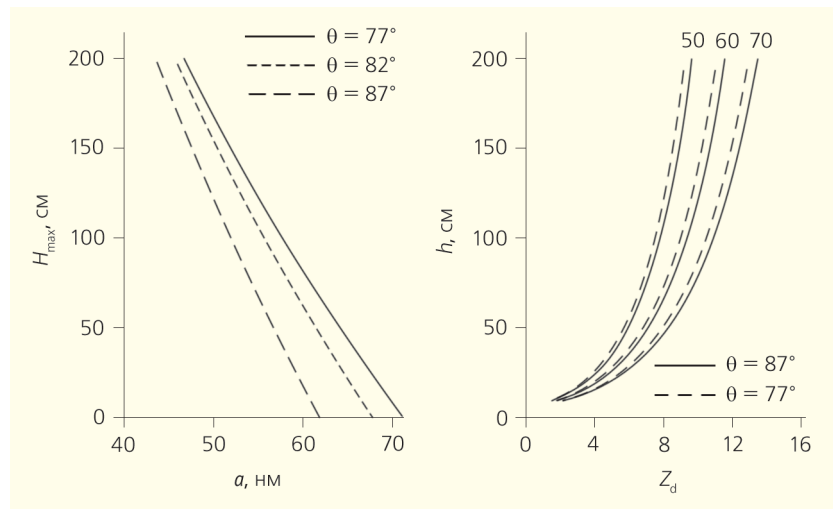


Рис.8. Максимально возможные высоты подъема пылевых частиц H_{max} определенного размера (слева) для значений $\theta = 77^\circ, 82^\circ, 87^\circ$ и высотные распределения зарядовых чисел Z_d пылевых частиц над освещенными участками лунного реголита для значений $\theta = 77^\circ, 87^\circ$ и размеров пылевых частиц 50, 60, 70 нм.

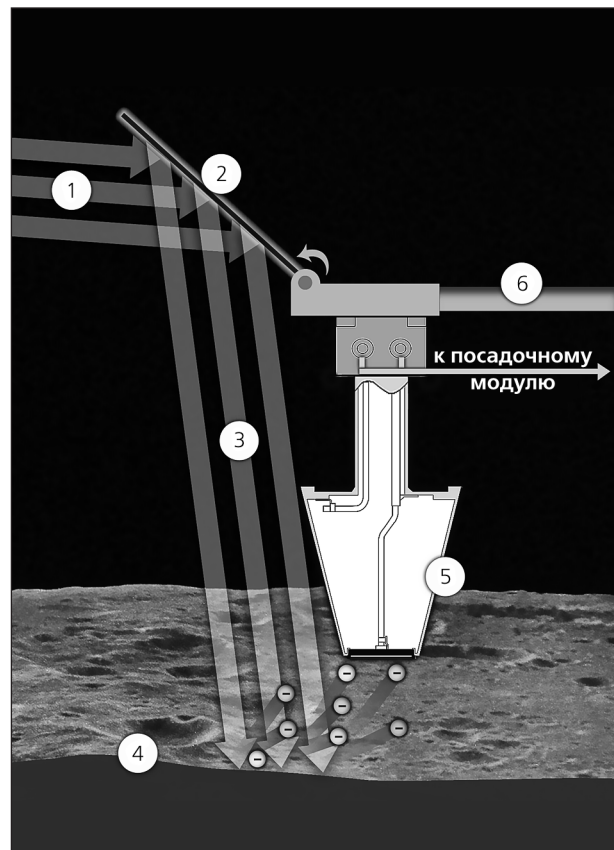


Рис.9. Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита. 1 — световой поток от источника излучения, 2 — зеркало, 3 — световой поток, преобразованный зеркалом, 4 — лунная поверхность, 5 — зонд Ленгмюра, 6 — штанга, на которой укреплено оборудование для измерений.

влияния фотоэлектронов от модуля на результаты измерений. Для этой цели предполагается также покрасить части аппарата, прилегающие к штанге, специальным красителем, который позволяет избежать генерации фотоэлектронов от этих частей.

Пока непонятно, как объяснить наличие субмикронной пыли в лунной экзосфере на больших высотах вплоть до примерно 100 км. По-видимому, для описания данного явления необходимо привлечь пылевые частицы, формируемые в экзосфере Луны за счет эффекта конденсации материала плюмов, т.е. направленных вверх струй испаренного вещества, создаваемых микрометеороидами в результате ударов о лунную поверхность [19]. Чтобы запыленные области образовались на больших высотах, скорость вещества плюма должна лежать в диапазоне от первой до второй космической скорости Луны, т.е. от 1.68 до 2.38 км/с. В рамках данного подхода можно объяснить недавние

наблюдения, выполненные в 2013–2014 гг. лунным орбитальным аппаратом LADEE (тогда было продемонстрировано существование на высотах от 30 до 110 км пылевых частиц со скоростями порядка первой космической скорости для Луны [5]).

* * *

Подводя итоги всему сказанному, хотелось бы еще раз подчеркнуть важную роль пыли, которую она играет в Солнечной системе. Пылевые наномасштабные частицы выступают в качестве основных элементов структуры в планетообразовании. Учет нано- и микромасштабных пылевых частиц и их взаимодействия с солнечным излучением необходим при описании Солнечной системы. Проявления нано- и микромасштабных компонент в космосе обусловлены модификацией характера коллективных процессов в плазме (при наличии заряженной пыли), новой физикой нелинейных волн, процессами самоорганизации и т.д. ■

Работа выполнена по Программе №9 фундаментальных исследований Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд», а также при поддержке РФФИ (проект 15-02-05627-а).

Литература

1. Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A. et al. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // Phys. Reports. 2005. V.421. №1–2. P. 1–103.
2. Богатилов О.А. Неорганические наночастицы в природе // Вестн. РАН. 2003. Т.73. №5. С.426–428.
3. Альвен Х., Арпенуус Г. Эволюция Солнечной системы. М., 1979.
4. Brownlee D.E. The Stardust comet mission: Studying sediments from the Solar System's frozen attic // Elements. 2012. V.8. №5. P. 327–328.
5. Elphic R.C., Delory G.T., Hine B.P. et al. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission // Space Sci. Rev. 2014. V.185. №1–4. P.3–25.
6. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н. и др. К вопросу о распределениях фотоэлектронов над освещенной частью Луны // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т.99. №3. С.131–137.
7. Mann I., Krivov A., Kimura H. Dust cloud near the Sun // Icarus. 2000. V.146. №2. P.568–582.
8. Rickman H. Composition and physical properties of comets // Solar System Ices / Eds B.Schmitt, C.de Bergh, M.Festou. Dordrecht, 1998. P. 395–417.
9. Interplanetary dust / Ed. E.Grün, B.A.S.Gustafson, S.Dermott, H.Fechtig. Berlin; Heidelberg; N.Y., 2001.
10. Vaisberg O.L., Smirnov V., Omelchenko A. et al. Spatial and mass distribution of low-mass dust particles (m less than 10 to the -10th g) in comet P/Halley's coma // Astron. Astrophys. 1987. V.187. P.753–760.
11. Divine N., Fechtig H., Gombosi T.I. et al. The comet Halley dust and gas environment // Space Sci.Rev. 1986. V.43. №1. P.1–104.
12. Popel S.I., Gisko A.A. Charged dust and shock phenomena in the Solar System // Nonlinear Processes in Geophysics. 2006. V.13. P.223–229.
13. Попель С.И. Мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиогеофизике // Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М.Зеленого, И.С.Веселовского. М., 2008. Т.2. С.371–394.
14. Flynn G.J. Changes to the compositions and mineralogy of the interplanetary dust particles by terrestrial encounters // Analysis of interplanetary dust (AIP Conf. Proc. V.310) / Eds M.E.Zolensky, T.L.Wilson, F.J.M.Rietmeijer, G.J.Flynn. Melville; N.Y., 1994. P.127–144.
15. Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // The Moon. 1974. V.10. P.121–142.
16. Zook H., McCoy J. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // Geophys. Res. Lett. 1991. V.18. №11. P. 2117–2120.
17. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П. и др. Пылевая плазма у поверхности Луны // Астрономический вестник. 2013. Т.47. №6. С.455–466.
18. Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust // Adv. Space Res. 2006. V.37. P. 59–66.
19. Popel S.I., Zelenyi L.M. Future Lunar missions and investigation of dusty plasma processes on the Moon // J. Plasma Phys. 2013. V.79. №4. P.405–411.