

ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ В КОСМОСЕ: ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2023 г. И. А. Кузнецов^{1,*}, А. В. Захаров¹, Л. М. Зеленый¹, С. И. Попель¹,
Т. И. Морозова¹, И. А. Шашкова¹, Г. Г. Дольников¹, А. Н. Ляш¹, А. Е. Дубов¹,
М. Е. Виктор², А. П. Топчиева³, Б. А. Клумов⁴, А. Д. Усачев⁴,
Е. А. Лисин⁴, М. М. Васильев⁴, О. Ф. Петров⁴, А. Ю. Поройков⁵

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

³Институт астрономии РАН, Москва, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*E-mail: kia@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 11.11.2022 г.

Космическая пыль и пылевая (комплексная) плазма являются одним из наиболее распространенных проявлений материи в космосе. Безатмосферные тела Солнечной системы, такие как Луна, астероиды, кометы, некоторые спутники планет подвержены непосредственному воздействию внешних факторов космического пространства — солнечного электромагнитного излучения, потоков межпланетной плазмы, космических лучей, микрометеоров. Под влиянием этих факторов на поверхности тел за геологические эпохи формируется реголит. Под действием ударов высокоскоростных микрометеоров пылевые частицы реголита разлетаются с разными скоростями. Большинство из них возвращаются на поверхность, но некоторые формируют пылевые облака, либо теряют гравитационную связь с родительским телом. Под действием солнечных излучений поверхность приобретает электрический заряд, и пылевые частицы при определенных условиях могут отрываться от поверхности реголита и левитировать. Наблюдательные свидетельства таких динамических явлений регистрировались на Луне и на некоторых астероидах. Изучение физических процессов, ответственных за активацию пылевых частиц и их динамику, представляет большой интерес для фундаментальной науки и практических целей. В статье рассматриваются основные процессы, происходящие при воздействии факторов космического пространства на реголит, в результате которых происходит движение пылевых частиц и формируется приповерхностная плазменно-пылевая экзосфера. Обсуждаются нерешенные проблемы. Рассматриваются методы и средства лабораторного моделирования при изучении активации и динамики пылевых частиц.

Ключевые слова: космическая пыль, пылевая плазма, пылевые частицы, экспериментальное моделирование, космические исследования

DOI: 10.31857/S0004629923010115, **EDN:** NQKDKG

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевые частицы (космическая пыль) — пожалуй, наиболее распространенный объект во Вселенной и Солнечной системе (см. рис. 1). Космическая пыль является основой звездообразования и формирования планетных систем. Было показано, что темные “дыры” в Галактике представляют собой затемненные области, заполненные космической пылью [1]. Более 4.5 млрд. лет назад из газо-пылевого облака образовалась Солнечная система. В настоящее время основным источником “первичной” космической пы-

ли в Солнечной системе являются ядра комет в периоды своей активности и потоки межзвездной пыли. Пыль этих объектов хранит информацию о происхождении Солнечной системы. Впервые такие пылевые частицы были зарегистрированы при выполнении международной программы исследований кометы Галлея вблизи нее [2]. Существенный вклад пылевые частицы вносят и в атмосферы планет, влияя на климат в глобальных масштабах. Безатмосферные тела Солнечной системы — астероиды, некоторые спутники планет, включая Луну, — также являются источниками межпланетной пыли.



Рис. 1. Примеры проявления пыли в космосе и атмосфере Земли: (а) — распределение пылевых структур в галактике Андромеда (Spitzer Space Telescope, NASA/JPL-Caltech/P. Barmby (Harvard-Smithsonian CfA)); (б) — космический ландшафт из газа и пыли, регион звездообразования NGC 3324 из Туманности Киля (James Webb Space Telescope, NASA, ESA, CSA, and STScI); (в) — потоки газа и пыли с поверхности кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (Rosetta, ESA /NAVCAM); (г) — изображение коронального и зодиакального света (CZL), сделанное космическим аппаратом Clementine, когда Солнце было позади Луны. Белая область на краю Луны — это CZL, а яркая точка сверху — Венера (Clementine, NASA); (д) — серебристые облака, наблюдаемые 6 июля 2020 г. в Нижнем Новгороде (снимок М.Е. Викторов).

Однако это другая, не “первичная”, а переработанная пыль. Она является результатом воздействия на поверхность безатмосферных тел внешних факторов космического пространства — микрометеоров, солнечного электромагнитного излучения, межпланетной плазмы, включая по-

токи солнечного ветра, энергичных космических лучей. Под этим воздействием коренные породы безатмосферных тел измельчаются, могут происходить химические преобразования вещества, при этом формируется и модифицируется реголит, основную часть которого составляют пыле-

вые частицы микронного и субмикронного размеров. Состав этой “переработанной” пыли во многом зависит от истории формирования родительского тела.

Для небольших тел Солнечной системы, прежде всего, малых астероидов в Главном поясе и во внутренних областях солнечной системы, которые не были подвергнуты эндогенным процессам, формирующаяся пыль в составе реголита близка по своему составу к первичным пылевым частицам, хондрам, из которых аккрецировались эти тела на ранних этапах развития Солнечной системы. Таких тел, которые по классификации астероидов относятся к классу углистых хондритов, подавляющее большинство. Для Луны и крупных астероидов, которые за свою историю были подвержены эндогенным процессам, пылевые частицы реголита являются, как правило, химически модифицированы, переработаны. Они несут информацию о процессах, которые происходили за время развития этого тела.

Под воздействием высокоскоростных микрометеоров, которое имеет взрывной характер, пылевые частицы реголита, отрываясь от поверхности безатмосферных тел, либо возвращаются по параболической траектории обратно на поверхность, либо, поднимаясь на большие высоты, могут формировать пылевые облака, гравитационно связанные с телом, либо, если их скорость превышает вторую космическую, навсегда покидают родительское тело, становясь межпланетной пылью. Под влиянием солнечного УФ-излучения и потоков солнечного ветра поверхность реголита и пылевые частицы, находящиеся на ней, приобретают электрический заряд, и над поверхностью реголита формируется электрическое поле. Под действием сил этого поля пылевые частицы при определенных условиях могут преодолевать гравитационные силы и силы Ван-дер-Ваальса, удерживающие их на поверхности. При этом микрочастицы отрываются от поверхности и левитируют. Именно такая – левитирующая – пыль вместе с околопланетной плазмой представляет собой приповерхностную разреженную (бесстолкновительную) плазменно-пылевую среду – экзосферу.

Левитирующие частицы, поднятые с поверхности реголита электростатическими силами, были зарегистрированы автоматическими посадочными аппаратами по рассеянию солнечного света на этих частицах на раннем этапе исследований Луны [3]. При выполнении американской пилотируемой программы Apollo астронавты столкнулись с тем, что пылевые частицы лунного реголита отрицательно воздействовали на работу служебных систем посадочных аппаратов, системы жизнеобеспечения, на здоровье астронавтов. При этом был сделан вывод, что антропогенный

фактор при посадке и старте космических аппаратов, а также в процессе деятельности человека на Луне, значительно активизирует динамику лунной пыли по сравнению с естественными природными плазменно-пылевыми процессами [4, 5]. Было отмечено, что фактор лунной пыли наряду с радиационным облучением является одним из главных факторов риска при осуществлении полетов человека на Луну [5].

Исследования “первичной” и “переработанной” пыли и формирующейся плазменно-пылевой среды представляют большой интерес с точки зрения фундаментальной науки. В первом случае такая плазменно-пылевая среда дает информацию о процессах звездообразования и формирования планетных систем. Во втором случае плазменно-пылевая среда у поверхности безатмосферных тел является уникальной естественной лабораторией по изучению воздействия потоков электромагнитного излучения, межпланетной плазмы, высокоэнергичных космических лучей и микрометеоритов на поверхность небесных тел. Кроме того, изучение динамики заряженных пылевых частиц важно с практической точки зрения для оценки их воздействия на служебные системы посадочных космических аппаратов, на системы жизнеобеспечения, на здоровье человека при подготовке пилотируемых полетов на Луну, для выработки методов и средств уменьшения такого воздействия.

Исследование физических процессов, связанных с плазменно-пылевыми процессами в космосе и, в частности, у поверхностей безатмосферных тел, а также при формировании планетных пылевых облаков, является основой проекта “Динамика пылевых частиц в космосе”, включенного в направление “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” создаваемого Научного Центра Физики и Математики (НЦФМ) в г. Саров. В статье представлен краткий обзор основных физических процессов в космосе, связанных с динамикой пылевых частиц. Основное внимание уделено рассмотрению внешних факторов космического пространства, воздействию их на реголит безатмосферных тел, анализу физических процессов при таком взаимодействии, формированию плазменно-пылевой экзосферы, динамике микрочастиц у поверхностей безатмосферных тел, процессам формирования планетных пылевых облаков. Рассмотрены нерешенные проблемы при исследованиях в этих направлениях. Представлены основные цели и задачи нового, развивающегося научного направления в НЦФМ, основанного на лабораторных исследованиях, обсуждаются основные методы таких исследований.

2. ВНЕШНИЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БЕЗАТМОСФЕРНЫЕ ТЕЛА

Тела солнечной системы, у которых отсутствуют заметная атмосфера и магнитное поле, подвержены непосредственному воздействию внешних факторов космического пространства. Под действием этих факторов за геологические эпохи происходит постоянное измельчение материала коренных пород безатмосферных тел, сопровождающееся его химической эволюцией, изменением рельефа поверхности. Внешние факторы можно разделить на два типа: (1) излучения Солнца и (2) микрометеорные потоки, которые принципиально различно воздействуют на поверхность тела. Все эти процессы приводят к формированию реголита [6, 7], приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере [3, 8, 9] и околопланетным пылевым облакам [10, 11].

2.1. Микрометеориты

Потоки микрометеоритов, падающих на Луну (так же, как и на Землю), в среднем можно рассматривать как изотропные [12, 13]. Их величина оценивается около 10^6 кг в год [14, 15, 13]. Плотность метеороидных частиц обычно близка к значению 2.5 г/см^3 . Большинство этих частиц имеют размеры от 10 нм до 1 мм, а скорость соударения в диапазоне 11–72 км/с [12, 13]. Параметры микрометеороидов определяются по характеристикам микрократеров, которые они формируют на поверхности Луны. В процессе соударения при высокоскоростном ударе происходит взрыв с образованием кратера на поверхности. При этом из кратера выбрасывается вещество реголита, масса которого может в тысячу раз превышать массу “ударника” [4, 16]. Значительная доля вещества, выбрасываемого с поверхности Луны в результате высокоскоростного удара о поверхность Луны, возвращается обратно на лунную поверхность, формируя и преобразуя слой реголита. Осаждение пылевых частиц на лунную поверхность при бомбардировке ее микрометеоритами и образовавшимися вторичными частицами оценивается в 800 частиц/(см² год) (для частиц размером более 1 мкм) [16]. Вторичные частицы микронного и субмикронного размера, выброшенные при ударе микрометеорита, у которых скорость выброса превышала первую космическую (для Луны $v_1 = 1.6 \text{ км/с}$), формируют пылевое облако вокруг Луны [13, 17]. При скорости выброса $v_2 = 2.4 \text{ км/с}$ вторичные частицы навсегда покидают Луну.

2.2. Солнечные излучения

Солнечный ветер, истекающий из солнечной короны, представляет собой поток электронов, протонов, около 4% ядер гелия и незначительное

количество ядер других элементов. При распространении от Солнца плотность плазмы уменьшается по квадратичному закону и вблизи Земли (и Луны) составляет $\sim 10 \text{ см}^{-3}$. Поток ионов солнечного ветра крайне изменчив во времени, и для Луны в среднем соответствует $4.5 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [18]. При взаимодействии с реголитом значительная часть солнечного ветра поглощается [19, 20]. Глубина поглощения ионов ничтожная и составляет меньше микрона. Результаты исследований взаимодействия солнечного ветра с Луной, выполненные космическими аппаратами Chandrayaan-1, Kaguya, Chang'E-1, ARTEMIS и IBEX, показали, что около 10–20% падающих на реголит ионов солнечного ветра захватывают электроны, и эти частицы рассеиваются в виде нейтральных атомов [21–23], а 0.1–1.0% ионов рассеиваются от поверхности, сохраняя положительный заряд [24, 25]. Кроме поглощения и рассеяния, ионы солнечного ветра могут также приводить к распылению частиц реголита [18].

Для реголита Луны также характерно воздействие энергичной магнитосферной плазмы, когда Луна, двигаясь по своей орбите, пересекает геомагнитный хвост, находясь там до трети орбитального периода. Структура геомагнитного хвоста достаточно сложна и динамична. В так называемых долях геомагнитного хвоста плазма очень разрежена [26], в то время как в плазменном слое регистрируются большие потоки энергичной плазмы, которые во время геомагнитных бурь могут достигать энергий в десятки килоэлектронвольт [3, 27]. В работе [28] детально рассмотрены процессы воздействия магнитосферной плазмы на лунный реголит.

Следует заметить, что при суточном вращении тел солнечное электромагнитное излучение приводит к значительным изменениям температуры реголита. Такие изменения могут вызывать структурную усталость материалов реголита и тепловое разрушение, что приводит к созданию слабосвязанного материала [29]. Например, для Луны диапазон температурных вариаций поверхности составляет от 120 К до 380 К [30].

Помимо потоков плазмы, поверхность Луны, астероидов и комет подвергается воздействию высокоэнергичных космических лучей солнечного и галактического происхождения. Частота возникновения солнечных вспышек очень вариabельна и зависит от одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Энергия ядер солнечных космических лучей (СКЛ) может достигать 10^8 эВ и даже 10^{10} эВ . Галактические космические лучи (ГКЛ), как и СКЛ состоят, в основном, из ядер водорода и гелия. Кроме того, ГКЛ включают заметное количество тяжелых ядер ($Z > 20$). Энергия ГКЛ распределена в очень широком диапазо-

не — от 10^9 до 10^{20} эВ. Потоки СКЛ и ГКЛ значительно меньше потоков плазмы солнечного ветра и составляют до $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для СКЛ и $2\text{--}4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для ГКЛ. В зависимости от энергии ядра СКЛ могут проникать в реголит на глубину от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, в то время как ядра ГКЛ — на глубину от нескольких сантиметров до нескольких метров [31, 32]. Энергичные СКЛ и ГКЛ так же, как и солнечное излучение, могут нарушать первоначальную кристаллическую структуру верхней поверхности частиц реголита [33].

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ У ПОВЕРХНОСТИ РЕГОЛИТА

3.1. Ударные процессы и происхождение лунной пыли

В результате воздействия высокоскоростных метеорных потоков на протяжении геологической истории Луны, коренные породы спутника разрушаются, и формируется покров рыхлого материала — реголита. Материал реголита состоит из обломков подстилающих горных пород, фрагментов минералов и вторичных частиц, сформированных при ударно-взрывной переработке вещества. Постоянное воздействие солнечного ветра и космического излучения обогащает частицы и минералы реголита водородом, изотопами гелия, редкими газами, космогенными изотопами. Примерно половина типичного лунного реголита по весу состоит из частиц в среднем микронного размера [34]. Удары микрометеоров могут приводить к образованию кратеров на поверхности. При этом происходит выброс материала из более глубоких слоев на поверхность. Такие многократно повторяющиеся высокоэнергичные процессы приводят к переработке реголита, модификации его структуры, химического состава и во многом к формированию рельефа поверхности [35].

Соударение высокоскоростного метеороида с поверхностью реголита, как правило, носит взрывной характер, приводящий к разрушению коренной породы тела. Оно сопровождается сильным сжатием и нагревом вещества ударника и мишени. В эпицентре взрыва образуется газ высокого давления, сильная ударная волна, распространяющаяся от эпицентра взрыва, ослабевающая при движении и трансформирующаяся в линейную звуковую волну. Этот процесс для случая лунной поверхности рассмотрен в работах [36, 37]. В этих работах процессы, происходящие при взрыве, условно разделены на несколько зон: (I) зона испарения вещества, (II) зона плавления вещества, (III) зона разрушения частиц, (IV) зона необратимых деформаций частиц и (V) зона упругих деформаций, характеризуемая значениями давления в звуковой волне меньшими, чем динамический предел упругости реголита. Примерная

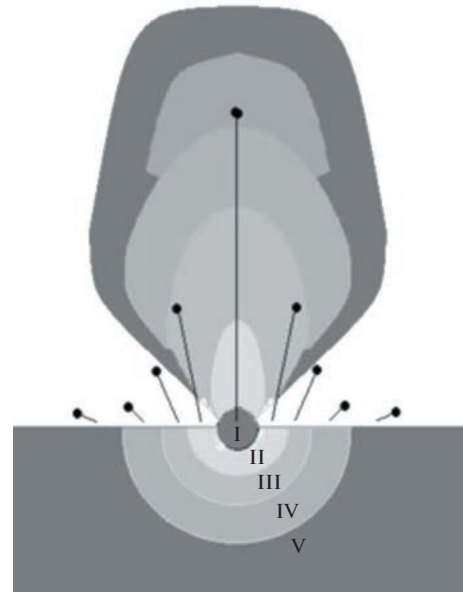


Рис. 2. Схема, характеризующая процессы, происходящие при высокоскоростном ударе микрометеора о поверхность безатмосферного тела. Отмечены условные зоны, характерные при таком ударе (обозначения указаны в тексте) [36].

схема положения зон при высокоскоростном ударе представлена на рис. 2 [36].

Оценки, выполненные в работе [36] для случая Луны, показывают, что материал, выброшенный из зон испарения и плавления (I) и (II) соответственно, может двигаться со скоростями, превышающими вторую космическую скорость для Луны, подниматься на высоты в несколько сотен километров и навсегда покинуть Луну, либо (если скорость выше первой космической, но не превышает вторую) участвовать в формировании пылевых облаков около Луны. Материал, выброшенный из зоны разрушения (III) и необратимых деформаций (IV), может достигать десятков километров, попадать на орбиты вокруг Луны, либо возвращаться на поверхность Луны по баллистическим траекториям. Большая часть частиц, отрывающихся от поверхности Луны при ударе метеороида о поверхность, с учетом адгезии и шероховатости поверхности, происходит из зоны упругих деформаций (V). Частицы или крупные фрагменты реголита, поднятые с поверхности Луны в результате упругих деформаций, могут достигать высот несколько десятков метров. При распространении ударной волны наряду с фазой сжатия формируется фаза разряжения. При этом для частиц, участвующих в этом процессе, появляется вертикальная компонента скорости, которая по порядку величины соответствует скорости распространения ударной волны.

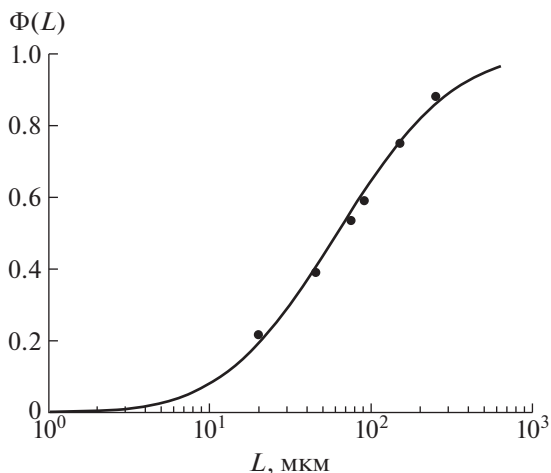


Рис. 3. Теоретическое распределение Колмогорова [40], описывающее данные наблюдений пылевых частиц на поверхности Луны (сплошная кривая). Точки соответствуют данным, приведенным в работе [3].

Попадая на орбиту Луны (либо малых тел), выброшенное с поверхности в результате ударов вещество может формировать околопланетные пылевые облака. Также, при ударах крупных метеоров, выделяемая энергия способна значительно влиять на состояние приповерхностной плазменно-пылевой системы, которую в таких случаях можно рассматривать как временную атмосферу [9, 37, 38].

Лунный реголит, являющийся основным источником вещества пыли над Луной, состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стеклов (в том числе стеклянных шариков), брекчий, фрагментов метеоритов и т.д. В реголите преобладают частицы со следами оплавления и спекания. Важной характеристикой реголита является распределение пылевых частиц по размерам. Для случая многократного дробления гранулометрический состав пылевых частиц удовлетворяет логарифмически-нормальному закону [39]. На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные при анализе размера отдельных частиц из доставленных на Землю образцов лунного грунта в диапазоне от 20 до 500 мкм, а также теоретическое распределение Колмогорова [40], описывающее данные наблюдений [3].

3.2. Плазменно-пылевые процессы

Солнечное электромагнитное излучение и потоки плазмы солнечного ветра, воздействуя непосредственно на реголит безатмосферных тел, создают токи через поверхность, в частности, фототок, ионный и электронный токи межпланетной плазмы, ток вторичных электронов (см., напр.,

[9, 41–45]). В равновесном состоянии, при сформировавшемся потенциале поверхности, сумма токов близка к нулю [46, 47]. Наиболее энергичная часть солнечного электромагнитного излучения — ультрафиолетовое излучение — играет важную роль в фотоэмиссии верхнего слоя реголита. Для образцов лунного реголита эффективность фотоэмиссии составляет $2.8 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (фототок $\sim 4.5 \text{ мкА/м}^2$) [48, 49]. На освещенной поверхности Луны плотность фототока J_{ph} обычно на порядок выше токов электронов J_e и ионов J_i солнечного ветра $|J_{ph}| \gg |J_e| \gg |J_i|$ [50]. В результате этого поверхность реголита, представляющая собой хороший диэлектрик [51], приобретает положительный заряд. Измерения показали, что электрический потенциал освещенной поверхности Луны в диапазоне широт $\pm 45^\circ$ от подсолнечной области составляет около $+10 \text{ В}$. С увеличением зенитного угла Солнца потенциал быстро падает, у терминатора становится отрицательным и может составлять -100 В [52]. По данным измерений Lunar Prospector, при взаимодействии с энергичными частицами отрицательный потенциал лунной поверхности может достигать -4.5 кВ [31]. Между положительно заряженной освещенной поверхностью безатмосферных тел и облаком фотоэлектронов над ней возникает двойной (плазменный) слой с электрическим полем E . Характерная толщина этого слоя порядка длины Дебая, для Луны это около 1 м [3]. Электрические поля становятся причиной левитации заряженных пылевых частиц реголита. На пылевые частицы, находящиеся на поверхности реголита, получившие электрический заряд q , действуют кулоновская сила F_q , гравитационная сила mg_L (m — масса частицы, g_L — ускорение свободного падения на Луне) и силы адгезии Ван-дер-Ваальса F_c . Если кулоновская сила отталкивания превышает сумму сил, удерживающих ее на поверхности, $F_q > mg_L + F_c$, частица отрывается от поверхности и левитирует в приповерхностном электрическом поле. Условием левитации частицы является приблизительное равенство электрической и гравитационной сил $F_q \approx mg_L$. При этом над поверхностью возникает экзосфера — бесстолкновительная плазменно-пылевая среда. Концепция левитации пылевых частиц над освещенной поверхностью реголита была предложена в работах [53, 54]. Именно в результате таких процессов бортовыми камерами посадочных аппаратов на ранних этапах исследований Луны наблюдалось “свечение лунного горизонта” (LHG, Lunar Horizon Glow) [3, 54, 55].

Этот эффект авторы интерпретировали как рассеяние солнечного света на микрочастицах, левитирующих над поверхностью. Это был не-

ожиданный результат, который послужил началом теоретических исследований динамики лунной пыли [8, 44, 56–61]. В настоящее время существуют общие представления о физических процессах у поверхности Луны, вызванных воздействием на реголит безатмосферных тел солнечных электромагнитных излучений и потоков плазмы, согласно которым пылевые частицы на освещенной поверхности Луны приобретают положительный заряд и под действием приповерхностных электростатических сил при определенных условиях способны отрываться от поверхности и левитировать.

Поднятые с поверхности реголита и левитирующие пылевые частицы, погруженные в межзвездную или межпланетную плазму, являются электрически заряженными [62] и, следовательно, связаны с плазмой через электрические и магнитные поля. Плазму, содержащую заряженные пылевые частицы, часто называют пылевой плазмой. При этом свойства такой плазмы определяются соотношением трех характерных масштабов длины: размеров пылинки a , длиной Дебая λ_d и среднего расстояния между пылинками $d \approx n_d^{-1/3}$, где n_d — плотность пыли. Космическая среда, состоящая из пыли и плазмы, может характеризоваться одним из двух условий: (1) $a \ll \lambda_d < d$ или (2) $a \ll d < \lambda_d$ [63]. В первом случае пыль можно рассматривать как совокупность изолированных частиц (“пыль-в-плазме”); во втором случае пыль участвует в процессе экранирования, т.е. в коллективном поведении ансамбля. Именно в этом случае среду называют пылевой плазмой. Плазменно-пылевая среда, включающая набегающие потоки плазмы, вторичные частицы, фотоэлектроны, левитирующие пылевые частицы реголита, а также крайне разреженная атмосфера Луны представляют собой бесстолкновительную экзосферу Луны, которая может распространяться на несколько сотен километров над поверхностью.

Вычисление распределений пылевых частиц и электронов в приповерхностном слое освещенной части Луны производится на основе теоретической модели, которая описывает динамику не взаимодействующих пылевых частиц, а также процесс их зарядки. Данные, характеризующие распределения пылевых частиц над участками лунного реголита, приведены на рис. 4 [9]. На этом рисунке представлены гистограммы, описывающие результаты расчетов концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов между местной нормалью и направлением на Солнце, равных 77° , 82° и 87° . Приведенные углы Солнца выбраны для рассмотрения условий в местах, планируемых для посадки космических аппаратов Луна-25 и Луна-27.

Особой зоной на поверхности безатмосферного тела с точки зрения электростатических процессов является зона терминатора, граница освещенной и затененной поверхности реголита. Над освещенной частью Луны основными составляющими приповерхностной плазмы являются фотоэлектроны и положительно заряженные пылевые частицы (см., напр., [9, 41–45]), тогда как над темной частью, как было указано выше, основной вклад вносят электроны солнечного ветра [64]. Над освещенной частью концентрации электронов и пылевых частиц всегда значительно выше, чем соответствующие концентрации над темной частью Луны. В районе терминатора могут возникать значительные электрические поля (~ 300 В/м) [45], представляющие собой аналог плазменного слоя [65]. В возникновении значительных электрических полей в области терминатора важную роль могут играть и другие эффекты, например, неоднородности поверхности, что подробно исследовалось в работе [44]. Однако процессы, происходящие в области терминатора, зависящие от вариабельности внешних воздействий на реголит, особенностей реального рельефа поверхности при постоянно изменяющемся угле Солнца, чрезвычайно сложно поддаются анализу, моделированию и к настоящему времени представляют собой нерешенную проблему.

Динамику пылевых частиц трудно моделировать из-за отсутствия экспериментальных данных о фотоэмиссионных и адгезионных свойствах лунного грунта. Дополнительная сложность моделирования связана с учетом эмиссии электронов с поверхности реголита при воздействии на него потоков солнечного ветра, при котором часть падающего потока обратно рассеивается (отражается), а другая часть возбуждает излучение вторичных электронов [66].

В табл. 1 представлена сводка параметров, характеризующих плазменно-пылевую экзосферу Луны.

Процессы формирования потенциала поверхности реголита, приповерхностного электрического поля и условий динамики пылевых частиц, происходящие на Луне, по-видимому, справедливы и для обычных астероидов, где реголит можно считать диэлектриком. Гипотеза электростатического подъема пылевых частиц реголита естественным образом распространилась и на эти безвоздушные тела [68, 69]. Подобные процессы регистрировались на астероиде Эрос [70] (так называемые “пылевые озера”), на поверхности ядра кометы 67P/Чурюмова–Герасименко [71, а также периодически появляющиеся радиальные спицы в кольцах Сатурна [72, 73]. Для комет в периоды отсутствия или очень слабой кометной активности, когда плазма солнечного ветра и солнечные УФ-фотоны непосредственно воздействуют на

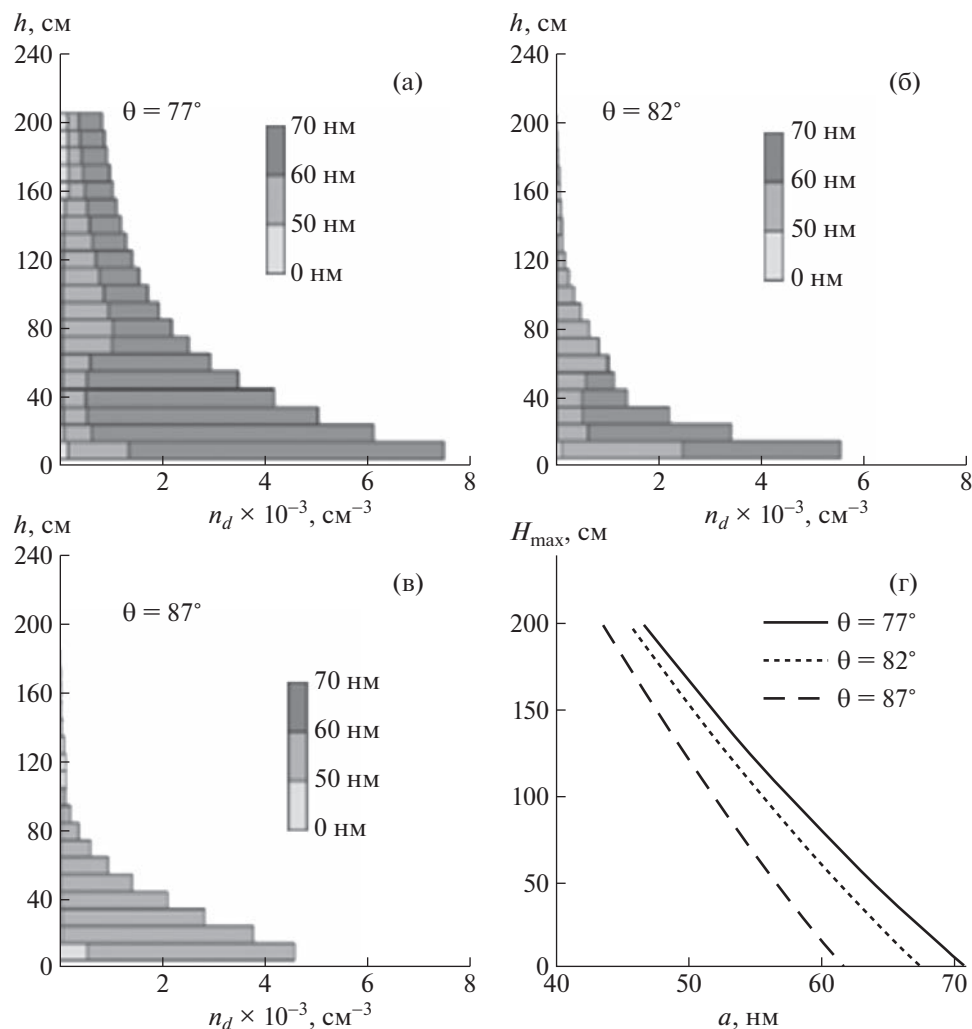


Рис. 4. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77^\circ$ (а), 82° (б), 87° (в) между местной нормалью и направлением на Солнце, а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (г).

ядро, поверхность ядра может приобретать заряд, и может наблюдаться левитация пыли подобно тому, как это происходит на Луне [74]. Оценки для ядра кометы 67P показывают, что в таких условиях потенциал поверхности в подсолнечной области может составлять ~ 6 В, и заряженные пылевые частицы с характерным размером < 100 нм под действием электростатического поля могут отрываться от поверхности и левитировать [75].

Для активности комет определяющим фактором является электромагнитное излучение Солнца, степень влияния которого зависит от параметров орбиты. Вдали от Солнца большая часть солнечной энергии переизлучается в виде теплового излучения, тогда как при приближении к внутренним областям Солнечной системы она поглощается ядром и может приводить к сублимации льдов, находящихся в недрах ядра. Учитывая, что

размеры ядер большинства комет составляют всего несколько километров, этот фактор играет большую роль в тепловой эволюции комет и ее активности. При приближении комет к внутренним областям солнечной системы большая часть выброшенных из ядра нейтралов ионизируются и захватываются (“picked up”) электрическим полем набегающего потока солнечного ветра. В результате солнечный ветер замедляется, передавая импульс заряженным частицам ионизированного газа [76]. Этот процесс, называемый “загрузкой” солнечного ветра частицами, массой, импульсом и энергией. Для комет наиболее важным является добавление массы (“mass loading” [77]). При активной дегазации в области перигея плотность газа может в значительной степени замедлять поток солнечного ветра, создавая головную ударную волну, плазменные переходные слои и диамагнитную полость, в которой плазма будет

Таблица 1. Параметры, характеризующие составляющие плазменно-пылевой экзосферы у поверхности Луны

Составляющие	Освещенная сторона Луны	Темная сторона Луны
Пылевые частицы, поднимающиеся над Луной за счет электростатических взаимодействий	Характерный размер ~ 100 нм, концентрация $\sim 10^3$ см $^{-3}$, заряд — положительный, модуль зарядового числа ~ 10 , температура поверхн. ~ 400 К	
Пылевые частицы, появляющиеся над поверхностью Луны из-за ударов микрометеороидов	Характерный размер ~ 1 – 10 мкм, концентрация $\sim 5 \times 10^{-9}$ см $^{-3}$, заряд — положительный, модуль зарядового числа ~ 100 – 1000	
Фотоэлектроны	А. Для значений кв. выхода [67]: концентрация $\sim 10^5$ см $^{-3}$, температура ~ 0.1 эВ Б. Для значений кв. выхода [48]: концентрация $\sim 10^2$ – 10^3 см $^{-3}$, температура ~ 1 эВ	заряд — отрицательный, температура поверхн. ~ 100 К
Электроны солнечного ветра	Концентрация ~ 10 см $^{-3}$, температура ~ 10 эВ	Концентрация ~ 0.01 – 10 см $^{-3}$, температура ~ 0 эВ
Ионы солнечного ветра	Концентрация ~ 10 см $^{-3}$, температура ~ 100 эВ	—
Электроны земной магнитосферы	Температура ~ 10 – 100 эВ и до 2 кэВ в плазменном слое	
Ионы земной магнитосферы	Концентрация ~ 0.1 – 1 см $^{-3}$, температура ~ 100 – 1000 эВ	

чисто кометного происхождения [78]. Детальное рассмотрение процессов взаимодействия солнечного ветра с кометами в их активной фазе выполнено в работах [79, 80].

вать пылевое облако, связанное с этим телом, либо навсегда покидать его. В данном разделе рассмотрены пылевые образования около планет земной группы и их спутников, Луны, астероидов, спутников Марса.

4. ПЛАНЕТНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ ОБЛАКА

При формировании приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы, рассмотренном в предыдущем разделе, важная роль принадлежит электростатическим процессам. По-видимому, существование значительных электрических полей у лунной поверхности, которые обеспечивали бы подъем заряженных пылевых частиц на большие высоты, встречается весьма редко. Однако постоянная бомбардировка высокоскоростными микрометеорами поверхности безатмосферных тел и взрывной характер такого взаимодействия приводят к интенсивному выбрасыванию материала реголита из области взаимодействия. Образовавшиеся в результате такого процесса вторичные частицы, в зависимости от начальной скорости ударника и массы самого тела, поднимаются на разные высоты. Большинство вторичных частиц (по крайней мере, для Луны) возвращаются на родительское тело. Но при достижении первой или второй космической скорости этого тела частицы могут либо формиро-

4.1. Пылевые облака Луны

Пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы. Причем эта система не ограничивается приповерхностной областью, где основным механизмом динамики пылевых частиц являются электростатические процессы при воздействии солнечных излучений. Уже первые исследования по поиску лунной ионосферы, выполненные радиозатменным методом [81, 82] с помощью советских лунных орбитальных станций, показали, что над освещенной стороной Луны была зарегистрирована концентрация электронов $n_e \sim 500$ – 1000 см $^{-3}$ с характерным высотным масштабом ~ 10 – 30 км. Столь высокие концентрации электронов могут быть обусловлены присутствующими на больших высотах над поверхностью Луны заряженными пылевыми частицами [83]. Кроме того, американские астронавты, выполнявшие полеты по программе Apollo, сообщали, что на высотах порядка 100 км над Луной наблюдаются свечения,

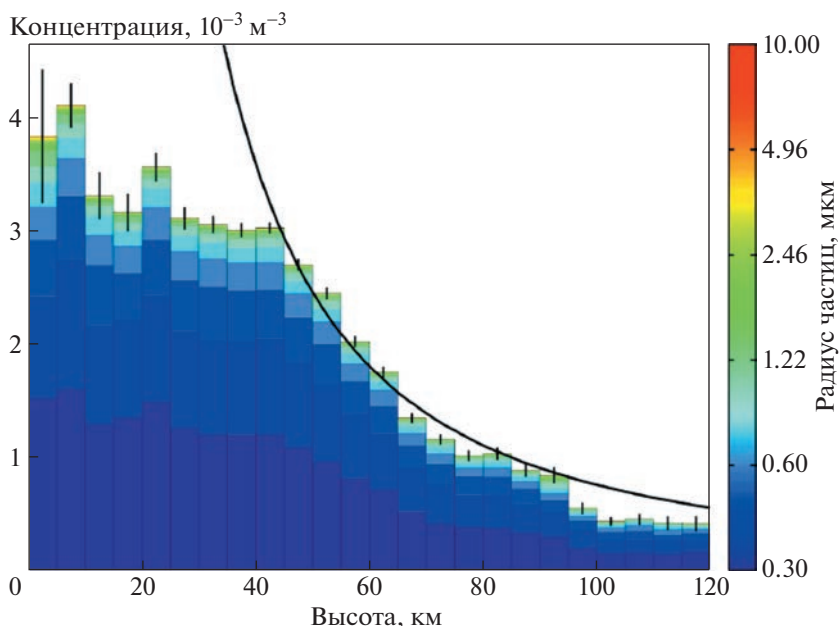


Рис. 5. Концентрации пылевых частиц различных размеров на разных высотах от поверхности Луны по данным эксперимента LDEX [11].

которые можно объяснить рассеянием света на микрочастицах, находящихся на больших высотах [84, 85].

Однако прямая регистрация пылевых частиц на высотах в диапазоне от нескольких километров до 250 км от поверхности Луны была выполнена только в 2013–2014 гг. с помощью прибора LDEX, установленного на американском спутнике Луны LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” [10, 11]). Основной целью этого прибора являлось обнаружить частицы микронного и субмикронного размера на больших высотах от поверхности Луны, охарактеризовать пространственную и временную изменчивость зарегистрированных пылевых образований и определить источники микрочастиц пылевых облаков, т.е. являются ли они (1) результатом выбросов вторичных частиц лунного реголита при высокоскоростной бомбардировке межпланетными метеорами, либо (2) результатом подъема микрочастиц реголита электростатическими полями, возникающими из-за плазменных процессов в приповерхностной экзосфере.

Прибор LDEX представлял собой ударный ионизационный датчик LDEX, позволяющий непосредственно детектировать пылевые частицы на орбите космического аппарата. Прибор позволял определять распределение пылевых частиц по высотам, размерам и концентрациям над различными участками лунной поверхности. Инструмент LDEX позволял фиксировать индивидуальные пылевые частицы с радиусами больше

0.3 мкм и измерять кумулятивный заряд от более мелких частиц (от 0.1 до 0.3 мкм).

Средняя скорость соударений пылевых частиц с чувствительной областью прибора составляла приблизительно 1.0 и 0.1 ударов в минуту для частиц с размерами $a > 0.3$ мкм и $a > 0.7$ мкм соответственно. Концентрация пылевых частиц в облаке находится в диапазоне $\sim (1-4) \times 10^{-9}$ см $^{-3}$. На рис. 5 представлены концентрации пылевых частиц различных размеров на разных высотах от поверхности Луны.

На рис. 6 изображены результаты измерений распределения концентрации лунной пыли в лунной экваториальной плоскости.

Результаты измерений не позволили обнаружить ожидаемого в рамках “фонтанной” модели динамики лунной пыли [86] увеличения концентрации пыли над областью терминатора за счет электростатических процессов. Однако было обнаружено скачкообразное возрастание концентрации пыли во время взаимодействия некоторых из ежегодных метеорных потоков с Луной, в частности, во время высокоскоростного метеорного потока Геминиды [11]. Все это указывает на связь между процессами формирования пылевого облака и соударениями метеоров с поверхностью Луны.

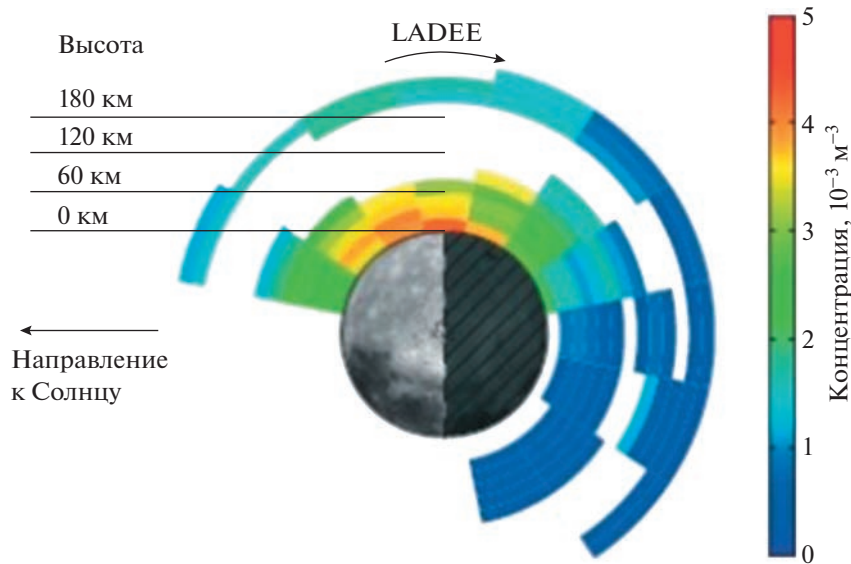


Рис. 6. Распределение концентрации лунной пыли для различных высот над лунной поверхностью в экваториальной плоскости Луны по данным LDEX. Белым цветом отмечены области, в которых достоверные данные получены не были [11].

4.2. Пылевой тор у Фобоса и Деймоса

Спутники Марса Фобос и Деймос так же, как Луна и астероиды, подвержены воздействию ударов высокоскоростных метеороидов и солнечным излучением. Однако результаты этого воздействия отличаются от того, что происходит на Луне, прежде всего из-за большого различия массы Луны и малых тел. При ударах метеороидов с одной и той же выделяемой энергией масса теряемого вещества малых тел значительно больше, чем для Луны.

Результаты спектрометрических измерений показывают, что реголит Фобоса, так же, как и реголит большинства астероидов, представляет собой углистый хондрит [87], а по своим размерам и положению в Солнечной системе спутник Марса очень похож на типичные астероиды [88]. Если удельное электрическое сопротивление верхнего слоя реголита Фобоса и Деймоса такое же, как у известных метеороидов или лунного грунта, его можно считать весьма эффективным диэлектриком [89]. Поэтому электростатические механизмы динамики пылевых частиц у поверхности спутников Марса также могут работать [90]. Основываясь на подходе, принятом для астероидов [68], и, принимая во внимание параметры солнечного ветра в окрестностях орбиты Марса (1.59 а.е.), ожидаемое значение напряженности электрического поля около освещенной стороны Фобоса/Деймоса составляет несколько вольт на метр и изменяется в зависимости от угла Солнца. Динамика мелких (< 1 мкм) пылевых частиц реголита Фобоса и Деймоса около поверхно-

сти, возникающая под влиянием внешних факторов, может рассматриваться как один из источников гипотетического пылевого тора Фобоса и Деймоса.

Существование пылевых колец вблизи орбит Фобоса и Деймоса было предсказано более 50 лет назад [91] и детально рассмотрено в [90, 92–97]. В этих работах было принято, что частицы метеороидных потоков, бомбардирующих спутники Марса, имеют массу в диапазоне $10^{-18} < m < 10^2$ г, а средняя скорость на орбите Марса составляет порядка 15 км/с [12, 98]. Образовавшиеся в результате бомбардировки вторичные частицы, выбитые с поверхности этих спутников, приобретают скорость, превышающую скорость убегания (для Фобоса это 10 м/с, для Деймоса 6 м/с), и покидают эти небесные тела. При этом, если скорость вторичных частиц оказывается меньше орбитальных скоростей спутников Марса ($V_{ph} = 2.1$ км/с для Фобоса и $V_D = 1.35$ км/с для Деймоса), частицы могут оказаться на орбитах вокруг Марса, образуя пылевое гало вблизи орбит Фобоса и Деймоса.

Распределение частиц в пылевом торе, их динамика, механизмы потерь частиц из тора и продолжительность существования частиц в торе в значительной степени зависят от их размеров (см., напр., [99]). Одним из ключевых параметров, определяющих динамику пылевых частиц на орбитах Марса, является коэффициент β — отношение давления солнечного излучения к силе гравитации [95]. Относительно крупные частицы с радиусом более ~ 10 мкм, для которых $\beta < 0.01$,

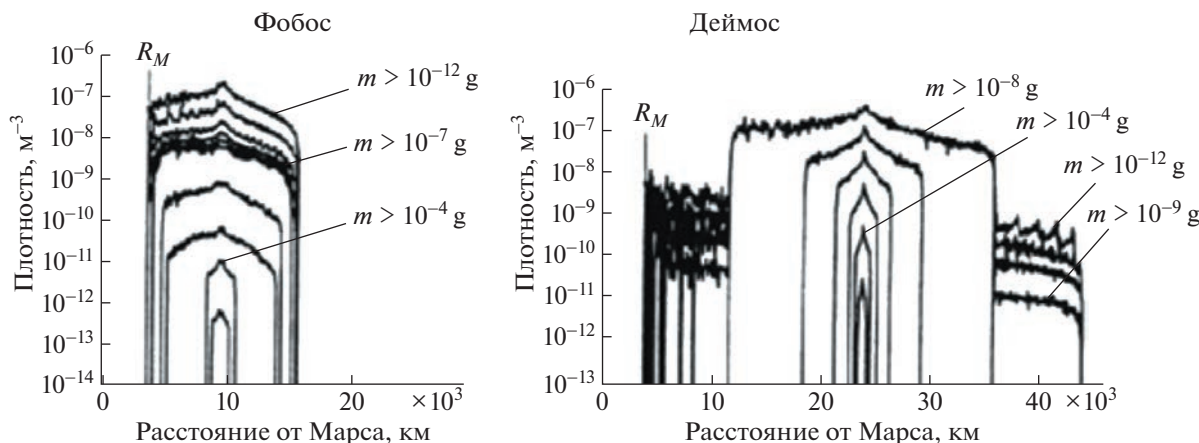


Рис. 7. Структура колец Фобоса и Деймоса, плотность колец на различных расстояниях от Марса для пылевых частиц с различными массами согласно модели [102]. При плотности частиц $\sim 2.5 \text{ г/см}^3$ массе 10^{-12} г соответствует размер $\sim 0.5 \text{ мкм}$, а массе 10^{-4} г — $\sim 200 \text{ мкм}$.

сосредоточены в тороидальном поясе вдоль орбит спутников. Основные возмущения орбитальной динамики таких частиц вызваны изменениями давления солнечного света, эксцентриситетом орбиты Марса и, в меньшей степени, влиянием несферичности Марса [96]. Ключевым механизмом потерь таких частиц является столкновение с родительским телом (Фобосом или Деймосом). Время жизни частиц (время до падения на Марс или его спутники) зависит от их размеров и колеблется от сотен лет (для частиц $\sim 10 \text{ мкм}$) до приблизительно одного года (для частиц $\sim 1 \text{ мм}$ и более). Для частиц с размерами от 1 до 10 мкм из-за давления солнечного излучения частицы падают на Марс за время менее одного года. Популяция очень маленьких, субмикронных частиц (менее 1 мкм, для которых коэффициент $\beta > 0.01$) может возникать не только в результате бомбардировки межпланетными микрометеороидами, но также вследствие воздействия плазменных процессов. Эта субмикронная пыль подвержена большому влиянию электромагнитных сил и, согласно модельным представлениям, образует протяженный ореол вокруг Марса [100, 101]. Рисунок 7 демонстрирует структуру колец Фобоса и Деймоса для частиц с различными массами [102]. На рисунке представлены модельные зависимости плотности частиц как функции расстояния от Марса для различных масс пылевых частиц в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-12} г .

Попытки наблюдений пылевых торов на орбите спутников Марса предпринимались неоднократно. Анализ снимков с целью обнаружения пылевых колец спутников Марса, сделанных аппаратом Viking 1, был отрицательным [103]. Отрицательный результат дали и исследования при помощи космического телескопа Hubble, HST [104].

Другой подход в поиске существования гипотетических марсианских пылевых торов или газовых деления и “убегания” пыли со спутников Марса основывается на изучении возмущений солнечного ветра, проходящего через скопления заряженных пылевых частиц около орбит Фобоса и Деймоса. Наблюдения возмущений солнечного ветра и магнитного поля при пересечении “хвоста” Фобоса и Деймоса и/или при пересечении орбиты этих спутников наблюдались несколькими космическими аппаратами: Марс-5 [105], Фобос-2 [106], Mars Global Surveyor (MGS) [107], Марс-Экспресс [108]. Однако по данным этих наблюдений убедительных выводов о существовании газового/пылевого тора вдоль орбит Фобоса/Деймоса пока не было сделано. По-видимому, марсианские спутники, а также небольшие астероиды, не обладающие собственным магнитным полем, сами по себе не вызывают значительных возмущений солнечного ветра, поскольку их размер меньше характерного радиуса ионного скин-эффекта солнечного ветра ($\sim 100 \text{ км}$). В случае, если малое тело (астероид) обладает собственным магнитным полем либо дегазирует, т.е. ведет себя подобно комете, взаимодействие его с солнечным ветром может быть значительным. Это же относится и к возмущению солнечного ветра при взаимодействии с заряженными частицами гипотетического пылевого кольца, связанного с такими телами, но пока этот вопрос остается открытым. Очевидно, для того, чтобы обнаружить и исследовать динамику пылевых частиц у поверхности марсианских спутников, а также зарегистрировать пылевой тор вблизи орбит этих малых тел, необходимо выполнить эксперименты с помощью чувствительных приборов — ударных датчиков пылевых частиц, датчиков электрического поля и оптических камер.



Рис. 8. Фотография пылевого вихря на Марсе (NASA's Mars Reconnaissance Orbiter, март 2012 г.).

4.3. Пылевые процессы в атмосферах планет

4.3.1. Роль пыли в атмосфере Марса. Пылевые и аэрозольные частицы также являются одной из важнейших компонент атмосфер внутренних планет Солнечной системы. Основной атмосферный цикл Марса определяется динамикой пыли в атмосфере [109]. В отличие от Земли, где тепловой баланс атмосферы и, в конечном итоге, поверхности определяется преимущественно газовым поглощением (водяной пар), разреженная атмосфера Марса нагревается пылью. Нагрев атмосферы пылью интенсифицирует циркуляцию, что усиливает подъем пыли, и, при некоторых условиях, такая положительная обратная связь вызывает глобальные пылевые бури. Переносимая в атмосфере пыль существенно влияет на динамическую и термодинамическую эволюцию атмосферы и приповерхностного слоя Марса [110, 111]. Пыль поглощает приходящее солнечное излучение видимого диапазона и задерживает уходящее от планеты тепловое излучение. Ветровой перенос пыли, участвуя в суточных, сезонных и годовых широкомасштабных изменениях атмосферной циркуляции, играет ключевую роль в формировании общего климата Марса и локальных метеоусловий [112]. На рис. 8 представлена фотография пылевого вихря на Марсе, сделанная в марте 2012 г. американским аппаратом NASA Mars Reconnaissance Orbiter.

Содержание пыли в атмосфере является критическим параметром при создании модели общей циркуляции, описывающей климат Марса. В настоящее время информация о содержании пыли в атмосфере определяется по измерениям оптической толщины пыли или вертикальных профилей пыли по измерениям с посадочных и/или орбитальных аппаратов [113–115], либо в результате моделирования процессов подъема пыли с поверхности и ее динамики циркуляционными атмосферными потоками [116–118]. Однако из-за недостатка экспериментальных данных существующие модели пока не в состоянии воспроизвести условия возникновения пылевых бурь. Попытка выполнить эксперимент на поверхности Марса по прямым регистрациям пылевых частиц и была предпринята для проекта ЭкзоМарс. С этой целью был создан прибор Пылевой Комплекс – первый прибор, который ставил своей целью детально изучить процессы подъема пыли с поверхности Марса и ее динамики в приповерхностных слоях, а также зарегистрировать электромагнитные эффекты вблизи поверхности Марса – электрические поля, электрическую проводимость атмосферы, электромагнитные излучения, связанные с динамикой заряженных пылевых частиц. Однако печальная судьба проекта ЭкзоМарс известна.

4.3.2. Пылевые структуры в атмосфере Земли. Летняя полярная мезосфера Земли является исключительно важным объектом исследования по

ряду причин. Во-первых, в такой мезосфере температура газа очень низка и местные пары воды пересыщены, что приводит к образованию на этих высотах серебристых облаков (NLC, Noctilucent Clouds) и так называемых полярных мезосферных радиоотражений — PMSE (Polar Mesospheric Summer Echoes). Физика образования и эволюции NLC и PMSE еще далека от полного понимания. Это связано с трудностью проведения экспериментов на этих высотах, а наземные и космические наблюдения не позволяют полностью выявить локальные особенности поведения плазмы в такой мезосфере. Пока только ясно, что оба этих явления связаны с наличием мелких (субмикронных) пылевых частиц в верхней мезосфере, которые образуются, скорее всего, при сгорании в верхней атмосфере субсантиметровых метеороидов. Также возможна и доставка мелкой пыли (в основном микрочастиц сажи, появляющихся в результате сгорания веществ и вулканической активности) с высот стратосферы за счет глобальной атмосферной конвекции.

Зарядка микрочастиц пыли приводит к сильному изменению состава местной плазмы и, как следствие, к ряду важных плазменных эффектов. Огромную роль играет коротковолновое солнечное излучение, которое также участвует в образовании плазмы на этих высотах и в фотоэлектрической зарядке микрочастиц. В летнее время в приполярных областях температура опускается до сверхнизких значений (125 K) и местные пары воды становятся пересыщенными, что запускает процесс гетерогенной нуклеации, что, в свою очередь, приводит к образованию, росту и седиментации ледяных частиц, а их центрами конденсации является местная субмикронная пыль. Седиментация таких частиц уравнивается восходящим потоком воздуха; такие потоки возникают в приполярных областях в результате глобальной циркуляции атмосферы. Это формирует на высотах около 82 км тонкие слоистые структуры, которые мы называем NLC [119–121]. PMSE формируются на высотах около 90 км и они состоят из более мелких пылевых частиц. Это принятый на сегодняшний день (хотя и несколько упрощенный) механизм образования серебристых облаков и PMSE в летней полярной мезосфере.

На рис. 9 показан пример образования пылевых структур (серебристых облаков) в летней полярной мезосфере, в котором реализован такой подход. Первоначально в мезосфере находились только субмикронные частицы, которые росли за счет аккреции молекул воды на поверхности частиц, а их динамика и зарядка определялись в рамках модели growth-sedimentation-charging [121, 122]. Показано, как со временем меняются высотное распределение микрочастиц и их характерный размер. Характерное время образования по-

добной пылевой структуры составляет несколько суток, а характерный размер частиц — сотни нанометров, что находится в хорошем согласии с результатами экспериментов. Отметим, что такая модель предсказывает бимодальное распределение микрочастиц в нижней части пылевой структуры, которое также наблюдалось в NLC [120].

Еще одним свойством NLC является то, что они, по-видимому, являются индикатором изменения климата на нашей планете, и с этой точки зрения NLC являются важным диагностическим инструментом. Современные глобальные климатические модели демонстрируют, что увеличение температуры в нижней атмосфере приводит к ее понижению в мезосфере. Действительно, частота образования NLC резко выросла в последние десятилетия. Выявление механизмов, ответственных за этот эффект, — важная проблема атмосферной физики.

В настоящее время активно обсуждается проведение эксперимента с выбросом первоначально монодисперсных металлических микрочастиц (оптические свойства которых хорошо изучены) в мезосферу с целью изучения плазменных свойств образовавшегося облака. Фактически в таком эксперименте будет создано долгоживущее плазменное зеркало, которое будет создано исключительно солнечным излучением и которое легко диагностируется наземными лидарами и радарам. Дополнительно эволюция такого облака позволит определить важные локальные характеристики среды: возмущения электрических и магнитных полей, свойства плазменной турбулентности и турбулентности нейтрального газа. В 80-е годы группой А.В. Гуревича планировались подобные эксперименты (на высотах стратосферы) с пробоем на скрещенных пучках радиоволн, в результате которых в стратосфере образуется искусственно ионизированная область [123]. Значительная нагрузка окислов азота в таких экспериментах встретила сопротивление ряда исследователей [124]. Предлагаемый эксперимент лишен всех этих недостатков.

Другим проявлением пылевой плазмы в атмосфере являются кратковременные эффекты от входа метеороидов в верхние слои атмосферы. В плазме хвостов метеороидов могут наблюдаться большие концентрации частиц [125] и, возможно, происходит их последующая коагуляция [126, 127]. Согласно существующим моделям [128, 129], в данных условиях в атмосфере ранней Земли могут происходить цепные химические реакции, в том числе приводящие к образованию сложных органических веществ.

При этом на процессы протекания химических реакций на поверхностях пылевых частиц и в газовой фазе в плазме хвостов метеороидов могут оказывать влияние токи плазменных частиц,

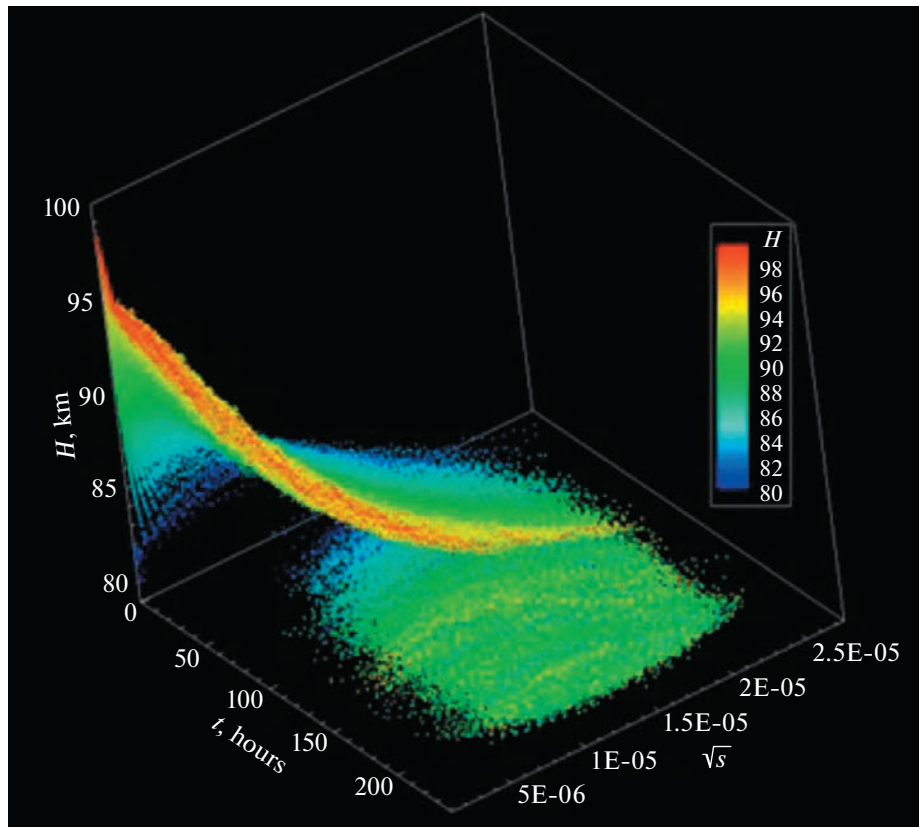


Рис. 9. Образование пылевых структур (серебристых облаков) в летней полярной мезосфере.

эмиссионные токи и неустойчивости, вызванные относительным движением плазмы ионосферы Земли и плазмы хвостов метеороидов: модуляционная неустойчивость нижнегибридных, ленгмюровских и электромагнитных волн [130], а также ряд других неустойчивостей.

Также существенное влияние на химические процессы может оказывать и поток молекул атмосферных газов на пылевые частицы раздробленного метеорного тела в хвостах метеороидов. При столкновениях на больших скоростях метеорной пыли и атмосферных газов молекулы могут сталкиваться с пылевыми частицами с выделением энергии, которая служит ускорителем химических реакций. Большой интерес представляют и процессы коагуляции пылевых частиц между собой в условиях высокой плотности пыли и приобретения частицами достаточно больших зарядов, в том числе разноименных [126, 127].

5. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ: КОСМИЧЕСКАЯ ПЫЛЬ

Межзвездная космическая пыль является одной из основных составляющих межзвездной среды. Пыль содержит значительную часть межзвездных тяжелых элементов, она играет фунда-

ментальную роль в процессе коллапса межзвездных облаков при формировании звезд. По оценке [131], пыль одновременно является субъектом и объектом в эволюции Галактики, постоянно эволюционирует и участвует в галактических эволюционных процессах. Помимо непосредственного участия пыли в процессах звездообразования, пылевые частицы влияют на скорость образования дозвездных ядер [132], а также, экранируя межзвездные молекулярные облака от радиации, являются катализатором для формирования молекул и перевода их из газовой фазы [133]. Одна из астрофизических задач, связанная с межзвездной пылью, направлена на исследование процессов образования сложных органических химических соединений на пыли. Важность этой задачи обусловлена тем, что такие процессы могут дать ответ на вопрос о происхождении и миграции жизни. Основные исследования в этом направлении основаны на молекулярной спектроскопии различных астрономических источников [134]. В последние годы проводятся интенсивные исследования по моделированию возникновения сложной органики в межзвездной среде (МЗС), в дозвездных ядрах и протопланетных дисках методами уравнения скорости [135–141], Монте–Карло [142–148], молекулярной динамики [149–154].

К настоящему времени на пылевых частицах в МЗС открыто примерно 270 молекул [155]. Исследования показали, что их химический состав во время раннего формирования планетарной системы солнечного типа является мощным диагностическим средством для отслеживания истории самой системы [156, 157]. Таким образом, остаточная пыль в Солнечной системе, астероиды, кометы, планеты, межзвездные облака — это те объекты, которые могут помочь ответить на вопрос, как за несколько миллионов лет, претерпевая изменения в физическом и химическом составе, менялась наша Солнечная система и другие планетные системы у других звезд.

Понимание процессов формирования планетных систем из пылевых частиц протопланетного диска до сих пор встречает большие трудности. Существует множество факторов, ограничивающих рост пылевых частиц еще до формирования крупных фрагментов и планетезималей. Среди этих факторов — электростатический барьер, барьер отскока, фрагментационный барьер, барьер радиального дрейфа. При этом у каждого барьера свои границы. Фрагментационный барьер способствует разрушению пыли по достижению размеров до 1 см, барьер дрейфа ограничивает размер частиц на масштабах в сантиметры–метры, электростатический — ниже микрометра [158] и т.д. Есть и известные исключения для данных ограничений. Например, фрагментационный барьер представляет меньше проблем для покрытых льдом пылинок. При тех скоростях, при которых голые силикатные пылинки разрушаются при столкновении, покрытые льдом пылинки слипаются, т.е. наоборот, растут [159, 160]. Также фрагментационный барьер и барьер радиального дрейфа могут быть преодолены при возникновении самоиндуцированных пылевых ловушек при совпадении ряда условий по соотношению количества пыли и газа [161].

Элементный и молекулярный состав пылевых частиц МЗС примерно известен. Из спектральных наблюдений МЗС [162] известно, что в межзвездной пыли есть силикаты, есть графитовая (углистая) составляющая, есть полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Стандартные и широко применяющиеся модели [163–165] отдельно рассматривают популяции мелких и крупных пылинок и отдельно — силикатные и углистые пылинки. В недавней статье [162] представлена новая модель межзвездной пыли, в которой нет отдельно силикатных и углистых пылинок, а вся пыль крупнее 0.02 мкм состоит из смеси графита и силикатов. Авторы называют этот материал “астропыль”. Все, что мельче — это композитные пылинки с включением ПАУ. Эта модель с некоторыми ограничениями хорошо описывает современные наблюдательные данные, но только для диффузной среды, а для молекулярных обла-

ков и протопланетных дисков ситуация может быть сложнее.

Также возникает и проблема распространенности кислорода в пыли [166–168]. Если посчитать суммарное количество кислорода в МЗС и вычесть кислород, находящийся в составе молекул межзвездного газа, получится значение большее, чем количество кислорода, находящегося в составе пылевых частиц. Однако неизвестно, где и в какой форме находится значительная часть кислорода в МЗС. Есть предположение, что он может быть в мелких пылинках из водяного льда [166].

Существует еще одна проблема, связанная с межзвездной пылью, — формирование и разрушение пыли при взрыве сверхновых [169, 170], а также дробление пыли в активных ядрах галактик [171]. Моделирование эволюции пыли в нашей и других галактиках показало, что производство пыли звездами, прошедшими этап эволюции, на порядки меньше, чем темп разрушения пыли в ударных волнах, созданных сверхновыми [172].

Большинство химических реакций происходят на поверхности пылинок, выступающих катализатором для формирования сложной органики. Поэтому химические процессы на поверхности пылинок также являются важным направлением лабораторных исследований [173, 174]. Потоки электронов и ионов на пылевые частицы могут создавать своего рода протонные градиенты, необходимые для жизнеспособных систем.

6. ОСНОВНЫЕ НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ДИНАМИКОЙ КОСМИЧЕСКИХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Несмотря на многочисленные работы, посвященные исследованиям физических явлений в космосе, связанных с плазменно-пылевыми процессами, в частности, у поверхностей безатмосферных тел, при формировании планетных пылевых облаков и других процессов, многие принципиальные вопросы требуют детального исследования и решения.

При исследовании процессов в приповерхностной плазме открытыми вопросами остаются характеристики реголита и его взаимодействие с внешними факторами космического пространства. В частности, отсутствуют убедительные данные об эффективности фотоэмиссии реголита при солнечном облучении (работа выхода, квантовый выход) — характеристиках, определяющих эффективность отражения (обратного рассеяния) набегающего потока плазмы, эмиссии вторичных электронов. Например, используемые в настоящее время данные [48, 67] о работе выхода электронов при фотоэффекте в значительной степени не согласуются и требуют дополнительных иссле-

дований. Открытой является проблема, связанная с условием отрыва пылевой частицы от поверхности реголита под действием электростатических сил. Действительно, чтобы оторвать микронную или субмикронную частицу от поверхности реголита электростатической силой, необходимо, чтобы, либо заряд пылинки, лежащей на поверхности, был очень большим, либо электрическое поле имело очень большое значение напряженности. Однако имеющиеся экспериментальные результаты этого не подтверждают. Попытки решить этот вопрос рассматривались в работах [175–179]. В работах [64, 180, 181] был предложен ряд механизмов, способствующих активизации динамики микрочастиц, однако вопрос об электростатическом механизме отрыва пылевых частиц от реголита остается открытым.

Существующие нерешенные научные проблемы, связанные с динамикой пылевых частиц в космосе, можно условно поделить на фундаментальные и прикладные. К фундаментальным научным проблемам относятся:

- динамика приповерхностной плазменно-пылевой среды безатмосферных тел, а именно, влияние внешних воздействий на активацию частиц, зависимость динамики частиц от их физических свойств, предельную интенсивность и другие;

- проблема существования (и обнаружения) околопланетных пылевых облаков (колец, торов, иных структур), зависимость их плотности от свойств родительских тел, планетных систем и внешних воздействий;

- вклад марсианской атмосферной пыли на климатические процессы, условия возникновения локальных и глобальных пылевых бурь, проблема ухода воды, конденсирующейся на пылевых частицах;

- образование и эволюция мезосферных явлений – серебристых облаков и полярных мезосферных аномалий в радиоотражениях;

- вопросы процесса формирования планетных систем;

- формирование сложной органики на поверхностях пылевых частиц в атмосферах планет и в космическом пространстве.

Данный перечень, конечно же, не является полным. Связанные с космической пылью научные проблемы, как можно видеть, носят крайне междисциплинарный характер. Так, например, процессы в плазменно-пылевых системах межзвездного происхождения, в плазме хвостов метеороидов, в плазме вулканического пепла, схожей по химическому составу с метеорным веществом, затрагивают один из главных нерешенных научных вопросов – проблему зарождения жизни.

К прикладным проблемам относятся, в первую очередь, проблемы, связанные с изучением и освоением космического пространства при помощи автоматических и пилотируемых аппаратов. Мелкодисперсная пыль обладает высокой адгезией и способна проникать в приборы, механизмы, мешать проведению научных исследований (в том числе, осаждаясь на оптических элементах), влиять на выработку энергии (осаждаясь на солнечных панелях), влиять на тепловой режим работы бортовых систем. С такими проблемами уже сталкивались американские астронавты в ходе работы на поверхности Луны по программе “Апполон”, а также при исследованиях с помощью автоматических КА (например, на Марсе во время пылевых бурь возникала необходимость перевода КА в режим “спячки”). Таким образом, изучение влияния заряженных пылевых частиц на работу приборов, механизмов КА, на свойства используемых материалов является важным в прикладных и технологических целях. При этом возникает необходимость разработки методов минимизации “токсичного” влияния пылевой плазмы на инженерные системы КА, исследовать степень ее воздействия на биологические организмы.

Существует множество других принципиальных физических проблем, решение которых необходимо для адекватного анализа процессов, происходящих у поверхности безатмосферных тел и динамики пылевых частиц при воздействии внешних факторов, воздействующих на реголит. В целом научные задачи, связанные с рассматриваемыми проблемами, можно классифицировать следующим образом:

- изучение электрофизических свойств реголита и влияние этих свойств на процессы воздействия внешних факторов космического пространства (эффективность фотоэмиссии, обратного рассеяния набегающего потока плазмы, эмиссия вторичных электронов и т.д.);

- разработка теоретических и численных моделей, описывающих приобретение электрического заряда пылевых частиц, лежащих на поверхности, достаточного для преодоления сил, удерживающих эти частицы на поверхности безатмосферного космического тела;

- исследования особенностей плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны, малых тел (астероидов, спутников Марса, комет) при различных условиях освещенности, включая области терминатора;

- вопросы пылевых звуковых волн в плазменно-пылевых средах вблизи поверхности Луны (условия возникновения и существования);

- лабораторное и численное моделирование для самосогласованного описания динамики пылевых частиц в экзосфере безатмосферных тел

(пылевая плазма) и в условиях разреженной атмосферы (например, Марса, активных комет);

- развитие методов регистрации микрочастиц, лабораторных средств исследований их активации и динамики;
- исследование методов и средств минимизации влияния пылевых частиц в приповерхностной экзосфере на служебные системы посадочных аппаратов и системы жизнеобеспечения;
- исследование плазменно-пылевых и сопутствующих химических процессов при разрушении микрометеороидов в атмосферах планет;
- разработка теоретических и численных моделей для исследования проблемы роста, эволюции, разрушения пылевых частиц в межзвездной среде, в протопланетных дисках, при взрывах сверхновых.

Здесь кратко перечислены основные, наиболее важные, на наш взгляд, проблемы, решение которых необходимо для понимания физических процессов динамики микрочастиц в космосе.

7. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ДИНАМИКОЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Наиболее эффективный метод исследований физических процессов в космосе — это прямые исследования тел и связанных с ними физических процессов методами космических исследований *in situ*. Именно исследования орбитальными и посадочными космическими аппаратами позволили получить современные представления о телах Солнечной системы и физических процессах в различных областях и средах при различных условиях космического пространства. Не менее важным значением этого метода исследований является то, что именно в результате анализа результатов прямых измерений *in situ* возникают дополнительные вопросы и нерешенные научные проблемы, которые являются основной мотивацией новых научных исследований. Однако по очевидным причинам возможности космических исследований ограничены. Поэтому большое значение имеют методы исследований, основанные на лабораторных экспериментах, численном, аналитическом моделировании физических процессов.

В последние десятилетия проводится активная работа, направленная на изучение плазменно-пылевых структур и динамики пылевых частиц под различными внешними условиями при помощи лабораторных методов и методов численного моделирования [182—184]. Активизацию исследований в этом направлении можно связать с тремя основными факторами: вновь возникший интерес к изучению Луны, в том числе при помощи

планируемых пилотируемых миссий; качественное улучшение характеристик полупроводниковой техники (вычислительной мощности, разрешения цифровых оптических сенсоров, доступность); а также возрастающий интерес к исследованиям свойств пылевой плазмы. Таким образом, для проверки наблюдаемых явлений и гипотез были созданы экспериментальные установки, стенды и лаборатории, направленные на изучение различных свойств пыли и пылевой плазмы при различных условиях, в том числе в космическом пространстве.

Следует отметить, что в лабораторных условиях пылевая плазма впервые наблюдалась Лэнгмюром еще в 1920-х годах [185]. Однако ее активное исследование началось лишь в последние десятилетия в связи с целым рядом практических приложений. В 1986 г. в работе [186] была предсказана возможность кристаллизации пылевой подсистемы в неравновесной газоразрядной плазме. Спустя несколько лет после опубликования этой работы пылевой кристалл удалось наблюдать экспериментально в плазме емкостного высокочастотного разряда вблизи границы прикатодной области [187—190]. На рис. 10 представлено изображение пылевых частиц, формирующих квазидвумерную структуру в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда.

Крайне интересные исследования, посвященные динамике пылевых частиц безатмосферных тел, импактным процессам и плазменно-пылевой динамике, проводятся в лаборатории Dust Accelerator Laboratory (DAL, Колорадо, США), являющейся частью виртуального института IMPACT (The Institute for Modeling Plasma, Atmospheres, and Cosmic Dust (IMPACT)) [183]. Одной из важных особенностей экспериментальной установки является возможность разгонять частицы с размерами от 0.03 до 2 мкм до скоростей от 0.5 до 115 км/с. Это иллюстрирует рис. 11.

Ключевыми элементами экспериментальной установки являются линейный ускоритель частиц Pelletron (с электрическим потенциалом до 3 МВ), устройство отбора частиц и комплекс экспериментальных вакуумных камер для изучения воздействия пылевых частиц на различные материалы при различных условиях. Важной особенностью является также модульность — возможность подключения вакуумных камер с различными условиями внутри. Такая модульность позволяет варьировать условия столкновений высокоскоростных частиц с мишенью и методы исследования таких столкновений в широком спектре возможностей. К настоящему времени на установке проведено множество экспериментов, например, изучение воздействия высокоскоростных частиц на тонкие пленки ПВДФ [191], процессы распада и ионизации при столкновениях

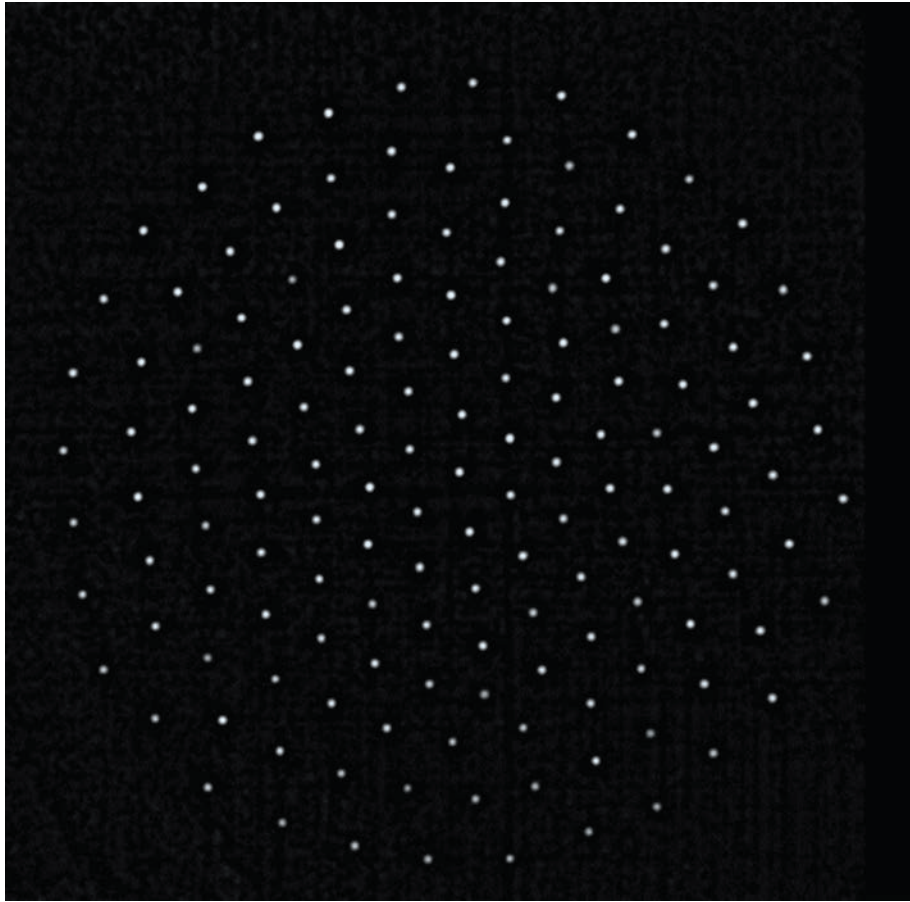


Рис. 10. Квазидвумерная пылевая структура в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда.

пылевых частиц [192], калибровки приборов [193] и многих других.

В институте IMPACT созданы вакуумные установки меньших масштабов, на которых активно ведутся работы по лабораторному моделированию разреженной плазмы, схожей по параметрам с экзосферной плазмой безатмосферных тел, и по развитию методов ее детектирования [182, 194]. Значимая часть работ группы также посвящена лабораторным исследованиям, имитирующим воздействие внешних факторов космического пространства на реголит безатмосферных тел [182, 195].

Исследованием механизмов отрыва пылевых частиц от поверхности при помощи экспериментальных методов занимаются также группы из Kyushu Institute of Technology (Япония) и ONERA (Франция). Исследования предполагают определение факторов и их пороговых значений, при которых возможна активация пыли при различных ее характеристиках. Например, в недавней работе японской группой [196] было показано, что плотность упаковки частиц реголита и количество полостей в реголите значительно влияют

на интенсивность отрыва частиц от поверхности при воздействии пучком электронов. Группа из ONERA проводила эксперименты по активации пылевых частиц при помощи жесткого УФ излучения и электрического поля [197]. Главными результатами таких экспериментов является приближение к пониманию роли внешних воздействий в активации и поддержании плазменно-пылевой динамики.

Механизмы заряда отдельных частиц микрометрового размера детально изучены в экспериментальных работах на стенде, позволяющем запитывать в центре электрического квадрупольа единичные частицы и исследовать их свойства в процессе облучения электронным и ионным пучками. Эти работы были проведены чешской группой в Карловом университете (Прага) [198].

Одним из важных направлений исследований является изучение образцов реголита, доставленных на Землю с Луны, астероидов, комет. Определение морфологических, минералогических, электрических и квантовых свойств реголита безатмосферных тел позволяет более точно спрогнозировать динамику таких частиц при воздействии

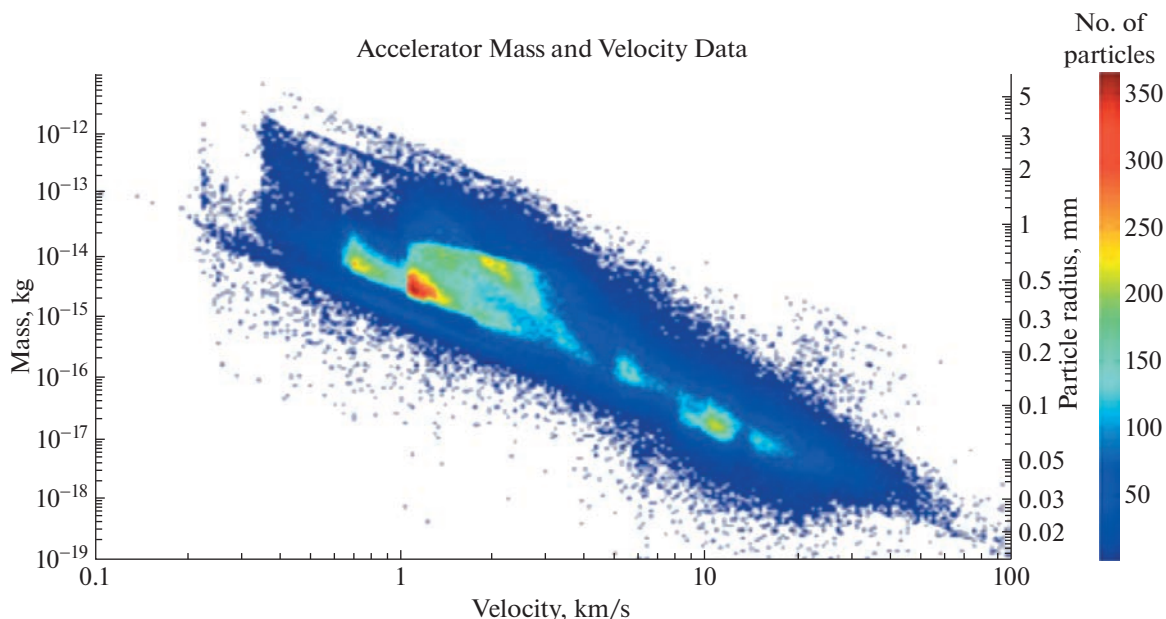


Рис. 11. Параметры экспериментальной установки DAL (<https://impact.colorado.edu/facilities.html>).

на них факторов космического пространства. Так, помимо определения гранулометрических и морфологических свойств привезенных образцов, для проведения теоретической и модельной работы необходимо знать такие параметры, как электропроводность, адгезивные свойства, работа выхода фотоэлектронов, коэффициент вторичной электронной эмиссии. Количественные параметры вторичной электронной эмиссии для образца лунного реголита (а именно, выход вторичных электронов, распределение их энергий), доставленного в ходе миссии Аполлон-16, были определены в ходе эксперимента, поставленного в Виргинском Университете (University of Virginia, США) [66], в ходе которого образцы лунного реголита облучались пучком электронов с различными энергиями, после чего замерялся выход вторичных электронов.

Лабораторные эксперименты по исследованию ионно-звуковых волн в пылевой плазме проведены в Университете Айовы и описаны в работах [199, 200]. В таких экспериментах волны в пылевой плазме могут возбуждаться как в результате внешнего воздействия [201], так и спонтанно [202–204]. Самовозбуждающиеся пылевые ионно-звуковые волны возникают вследствие развития ионной потоковой неустойчивости и распространяются, как правило, вдоль направления движения потока ионов. Для пылевой плазмы с частицами микрометрового размера такие волны исследуются в условиях микрогравитации с помощью параболических полетов и на Международной космической станции [205–207]. В нормальных лабораторных условиях такие самовоз-

буждающиеся волны наблюдаются в зоне анодного разряда, где поток ионов может быть достаточно сильным, чтобы вызвать неустойчивость [208, 209]. С момента открытия было проведено множество исследований по изучению линейных и нелинейных характеристик ионно-звуковых волн в пылевой плазме, в основном содержащей частицы микрометрового размера [210]. Значительное количество исследований было посвящено изучению взаимодействия волна–частица [211, 212], закону дисперсии [208, 213–216], разрушению или слиянию волн [217, 218], ударным волнам [219], образованию частотных кластеров [220, 221], и турбулентности [222, 223]. В последнее время подробно изучается влияние внешнего магнитного поля на распространение волн в пылевой плазме [224, 225]. Обнаружено, что волновая активность прекращается при более сильном магнитном поле.

По результатам экспериментов с пылевой плазмой с частицами пыли субмикронного размера, проведенными в Кильском университете имени Кристиана Альбрехта (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Германия), обнаружено много новых эффектов [203]. Поскольку плотное облако частиц сильнее влияет на фоновую плазму, а также на характеристики разряда, существенно большая часть свободных электронов плазмы теряется в процессе зарядки плотного облака пыли, и средний заряд субмикронных частиц пыли уменьшается до нескольких десятков элементарных зарядов. При этом условие нейтральности заряда в плазме изменяется, что, в свою очередь, существенно влияет на распространение волн в пы-

левой плазме. В таких условиях характеристики пылевых ионно-звуковых волн могут быть использованы для оценки заряда частиц пыли, а также параметров плазмы внутри плотного облака пыли.

В настоящее время значимая часть экспериментов по изучению свойств пылевой плазмы проводится в газовых разрядах различных типов, в частности: в высокочастотном газовом разряде и стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока.

Например, одним из способов создания пылевой плазмы субмикронного размера является емкостной высокочастотный разряд, где формирование частиц пыли происходит в присутствии реактивных газов, таких как силан (SiH_4), ацетилен (C_2H_2) и метан (CH_4) [226–232]. При этом плазмообразующим газом, как правило, является аргон. Концентрация и размер частиц пыли, сформированных в газовом разряде, увеличиваются со временем и влияют на параметры самого разряда и его динамику. Геометрия разрядной камеры и расположение электродов генератора могут существенно различаться для реализации конкретного эксперимента. Вследствие того, что частицы пыли достаточно массивны, динамика плазменно-пылевых образований может быть детально визуализирована с помощью высокоскоростных камер [233–235].

В Российской Федерации лабораторное моделирование плазменно-пылевых процессов проводится в нескольких организациях. Как было отмечено во Введении, первые работы по созданию в лабораторной плазме регулярных структур из пылевых частиц (“пылевых кристаллов”), были начаты в 1994 г. и продолжаются в Объединенном институте высоких температур РАН.

Экспериментальные исследования пылевой плазмы в лабораториях имеют одну общую особенность: пылевые структуры в земных лабораторных установках подвержены влиянию силы тяжести. В результате воздействия этой силы пылевая компонента падает на дно экспериментальной камеры. При моделировании в определенных специфических условиях (например, при невесомости или у поверхностей Луны, астероидов) удается компенсировать (или частично компенсировать) земную гравитацию с помощью различных компенсирующих сил, например, электрической и термофоретической. Для экспериментального исследования свойств пылевой плазмы в условиях невесомости наиболее удобным способом является размещение экспериментальных установок на орбитальных платформах. ОИВТ РАН является пионером таких экспериментов на пилотируемых орбитальных станциях. В 1998 г. на борту орбитального комплекса “Мир” совместно с РКК “Энергия” ОИВТ РАН впервые

были поставлены эксперименты по изучению плазменно-пылевых структур в условиях микрогравитации на орбитальной станции “Мир” [236, 237]. С 2001 по 2012 г. на Международной космической станции активно велись совместные российско-германские эксперименты “Плазменный кристалл-3 Нефедов” (ПК-3 Нефедов) [238] и “Плазменный кристалл-3 Плюс” (ПК-3 Плюс) [239], подготовка которых осуществлялась сотрудниками ОИВТ РАН под руководством академика В.Е. Фортова и сотрудниками Института внеземной физики общества М. Планка (Германия) под руководством профессора Г.Е. Морфилла.

На установке “ПК-3 Плюс” было исследовано новое состояние пылевой плазмы – электрореологическая плазма, в которой происходит переход от изотропной плазменно-пылевой жидкости к анизотропному состоянию [240]. Среди наблюдаемых явлений было образование полостей (областей, свободных от микрочастиц, образующих пылевую плазму) [241].

В 2010 г. на борту МКС был начат космический эксперимент “Кулоновский кристалл” по формированию в магнитных ловушках кулоновских кластеров диамагнитных частиц [242]. В рамках эксперимента были исследованы динамика заряженных макрочастиц и образование анизотропных (цепочечных) структур в условиях микрогравитации [243], в том числе при наложении неоднородного электрического поля [244].

В настоящее время на борту МКС проводятся плазменно-пылевые эксперименты на российско-европейской установке нового поколения “Плазменный кристалл-4” (ПК-4) [245]. Научная аппаратура ПК-4 была разработана в ОИВТ РАН и доставлена на МКС в ноябре 2014 г. (рис. 12). На установке был получен ряд приоритетных результатов: новый вид ионизационной неустойчивости протяженного плазменно-пылевого облака [246], долговременная эволюция трехмерной структуры протяженного однородного плазменно-пылевого облака в разряде постоянного тока с переключаемой полярностью [247], определена верхняя граница сдвиговой вязкости в пылевой подсистеме [248], изменена скорость плазменно-пылевого звука вдоль струнной структуры облака [207], получены плазменно-пылевые кластеры не в электрической ловушке, а при обжати плазменными потоками. Научная программа исследований постоянно обновляется Международной научно-технической группой, состоящей из примерно 20 ученых из России, Германии, США, Франции, Японии, Китая, Казахстана и других стран.

На стендах ОИВТ РАН с плазмой тлеющего разряда постоянного тока был получен целый ряд приоритетных результатов, в том числе: обнаружено формирование отдельных пылевых цепоч-



Рис. 12. Космонавты Елена Серова и Александр Самокутяев (фотографирует) монтирует экспериментальную камеру ПК-4 массой 100 кг в европейском модуле Колумбус на борту МКС (Роскосмос-ЕКА, ноябрь 2014 г.).

чек, включающих до нескольких десятков частиц [128, 249]; изучено формирование пылевых облаков в плазме при криогенных температурах вплоть до 1.7 K [250, 251] и при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 2500 Гс [252]; изучены динамические особенности пылевых структур, такие как нелинейные волны и вихри [253, 254]; исследовано эффективное нарушение симметрии сил взаимодействия между двумя пылевыми частицами [255].

С плазмой высокочастотного емкостного разряда была впервые исследована зависимость сил взаимодействия между частицами в плазменно-пылевом монослое [256, 257]; экспериментально обнаружен двустадийный характер плавления “кристалл–жидкость” квазидвумерной плазменно-пылевой структуры с образованием промежуточной гексатической фазы [258]; исследована модификация поверхности пылевых частиц во время длительной левитации в приэлектродном слое [259].

Активные работы по моделированию динамики пылевых частиц, имитирующих различные условия космического пространства, проводятся на лабораторных установках в Институте космических исследований РАН [235, 260], Институте прикладной физики РАН и других организациях.

В части исследований процессов, связанных с пылевыми частицами межзвездной среды, лабо-

раторные эксперименты проводятся в астрохимической лаборатории Уральского федерального университета. Исследуются рост и распад пылинок, химические процессы на поверхности, проводятся эксперименты по выращиванию межзвездных льдов с целью определения содержания в них сложной органики, включая возникновение сложных органических молекул. В одной из недавних работ описан метод экспериментального моделирования фотопроцессов на пылевых частицах с использованием источника жесткого УФ-излучения [261]. Проводится изучение скорости реакций и получения тех или иных соединений на поверхности пыли [173, 174, 262, 263].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования космических пылевых частиц направлены на решение проблем происхождения и эволюции Галактики, планетных систем, а также динамических процессов на поверхности безатмосферных тел Солнечной системы при воздействии на них внешних факторов космического пространства. Эти процессы носят комплексный характер, так как происходят при взаимодействии основных составляющих Вселенной — плазмы и заряженных пылевых частиц, которые связаны через электрические и магнитные поля и представляют собой единую плазменно-пылевую

среду. На поверхностях безатмосферных тел при воздействии на них солнечных электромагнитных излучений, потоков солнечного ветра, и при постоянной бомбардировке микрометеорами, пылевые частицы реголита способны отрываться от поверхности тел и левитировать. При этом над поверхностью создается плазменно-пылевая экзосфера — уникальная естественная лаборатория, которая позволяет изучать фундаментальные процессы, характерные для широкого класса тел Солнечной системы, в частности, Луны, спутников некоторых других планет, астероидов, комет. Кроме того, такие исследования имеют важное практическое значение. Опыт выполнения американской пилотируемой программы Apollo показал, что левитирующие пылевые частицы, воздействуя на служебные системы посадочных аппаратов, ухудшают их характеристики, отрицательно воздействуют на деятельность и здоровье астронавтов. Был сделан вывод, что воздействие лунной пыли — это проблема номер один при освоении Луны.

Основным методом исследований динамических процессов плазменно-пылевой среды в межпланетном пространстве и у поверхностей безатмосферных тел, помимо исследований *in situ*, которые очевидно ограничены, являются лабораторные эксперименты, численное, аналитическое моделирование физических процессов. При всем разнообразии экспериментальных работ, проведенных за последние десятилетия на нашей планете и вне ее, остается немало нерешенных вопросов в исследовании физики пылевой плазмы. Для их решения необходимы новые подходы, создание новых экспериментальных стендов, позволяющих создавать и с высокой точностью диагностировать плазменно-пылевые процессы, свойственные нашей Вселенной во всем ее многообразии. Так как научные проблемы, связанные с плазменно-пылевыми явлениями, носят явно междисциплинарный характер, то и подход к созданию новых стендов и разработке экспериментальных методов должен быть соответствующим.

Например, для изучения процессов, связанных с высокоскоростными ударными процессами, необходимо создание инжектора пылевых частиц со скоростями инжектирования свыше 10 км/с. Такая установка могла бы позволить изучать как процессы соударения микрометеоритов с реголитом безатмосферных тел, так и процессы эрозии и деградации материалов, плазменно-пылевые процессы при входе метеороидов в атмосферы планет и другие.

Дополненный имитатором солнечных излучений такой экспериментальный комплекс мог бы позволять моделировать целый спектр плазменно-пылевых явлений. Такой экспериментальный комплекс должен обеспечивать возможность

длительного комбинированного воздействия на детектор или опытный образец нескольких внешних факторов, имитирующих космическую среду: вакуум; изменение температуры в широком диапазоне и с большой скоростью; потоки заряженных, электрически нейтральных и микрочастиц; ультрафиолетовое излучение, в том числе жесткое. Также необходима возможность создания электрических и магнитных полей различной напряженности.

Изучение плазменно-пылевых процессов в хвостах метеороидов возможно проводить при помощи облучения СВЧ-волнами метеоритного порошка с базовой органикой с воссозданием условий, моделирующих плазму хвостов метеороидов. Такая экспериментальная установка должна включать в себя генератор импульсного СВЧ-излучения, реактор, в который помещены пылевые частицы, масс-спектрометр, регистрирующая аппаратура. Под действием импульсного генератора СВЧ излучения будут достигнуты концентрации плазмы, характерные для хвостов метеороидов, а именно, температура плазмы 1 эВ, плотность плазмы $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Было показано [264], что в результате такого воздействия могут происходить цепные химические реакции. С помощью лазерной абляции [128, 129] можно воссоздать параметры температуры и давления, характерные для плазменно-полевого хвоста метеороида без ускорения частиц до скоростей метеорных тел. Химия последующих стадий также хорошо воспроизводится лазерной абляцией, поскольку вещество оказывается в той же самой точке фазовой диаграммы.

Экспериментальная база, созданная для моделирования процессов, происходящих у поверхностей безатмосферных тел Солнечной системы, в атмосферах Земли, Марса и других планет, в межпланетной среде и за пределами Солнечной системы, даст возможность получить ответы на многие нерешенные вопросы междисциплинарного характера, связанные космическими пылевыми частицами, а также отработать практически методы минимизации негативного воздействия таких частиц при выполнении автоматических и пилотируемых экспедиций в космических условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана Национальным центром физики и математики (г. Саров) в рамках проекта № 10: “Исследование плазменно-пылевых процессов в экзосфере Луны и других безатмосферных тел Солнечной системы методами лабораторного моделирования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. J. Trumpler, Publ. Astron. Soc. Pacific **42**, 214 (1930).
2. R. Z. Sagdeev, J. Blamont, A. A. Galeev, V. I. Moroz, V. D. Shapiro, V. I. Shevchenko, and K. Szego, Nature **321**, 259 (1986).
3. J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, and S. Sture, Rev. Geophys. **45**, id. 2006 (2007).
4. C. M. Katzan and J. L. Edwards, Lunar dust transport and potential interactions with power system components, NASA-CR-4404 E-6145, Project: RTOP 506-41-41, id. 19920002733 (1991).
5. J. R. Gaier, The effects of lunar dust on eva systems during the apollo missions, NASA/TM-2005-213610/REV1 E-15071-1/REV1, id. 20070021819 (2005). <http://www.sti.nasa.gov>.
6. E. Kallio, S. Dyadechkin, P. Wurz, and M. Khodachenko, Planet. Space Sci. **166**, 9 (2019).
7. P. O'Brien, S. Byrne, and T. J. Zega, 50th Lunar and Planetary Science Conference 2019 (LPI Contrib. No. 2132), id. 2003 (2019), <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/2003.pdf>.
8. S. I. Popel and L. M. Zelenyi, J. Plasma Phys. **80**, 885 (2014).
9. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, A. P. Golub', and A. Y. Dubinskii, Planet. Space Sci. **156**, 71 (2018).
10. M. Horányi, Z. Sternovsky, M. Lankton, C. Dumont, et al., Space Sci. Rev. **185**, 93 (2014).
11. M. Horányi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grün, R. Srnna, and Z. Sternovsky, Nature **522**, 324 (2015).
12. E. Grün, H. A. Zook, H. Fechtig, and R. H. Giese, Icarus **62**, 244 (1985).
13. E. Grün, M. Horányi, and Z. Sternovsky, Planet. Space Sci. **59**, 1672 (2011).
14. К. П. Флоренский, А. В. Иванов, в сб. Космохимия Луны и планет (М.: Наука, 1975), с. 439 (1975).
15. H. A. Zook, Planet. Space Sci. **23**, 1391 (1975).
16. D. E. Brownlee, W. Bucher, P. Hodge, W. Bucher, and P. Hodge, Analysis of Surveyor 3 material and photographs returned by Apollo 12, NASA-SP-284 LC-70-181874, id. 19720019081 (1972).
17. Y. Liu and L. A. Taylor, Planet. Space Sci. **59**, 1769 (2011).
18. P. Wurz, U. Rohner, J. A. Whitby, C. Kolb, H. Lammer, P. Dobnikar, and J. A. Martín-Fernández, Icarus **191**, 486 (2007).
19. W. C. Feldman, D. J. Lawrence, R. C. Elphic, B. L. Barraclough, S. Maurice, I. Genetay, and A. B. Binder, J. Geophys. Res. Planets **105**, 4175 (2000).
20. D. H. Crider and R. R. Vondrak, Adv. Space Research **30**, 1869 (2002).
21. D. J. McComas, F. Allegrini, P. Bochslers, P. Frisch, et al., Geophys. Res. Letters **36**, id. L12104 (2009).
22. M. Wieser, S. Barabash, Y. Futaana, M. Holmström, et al., Planet. Space Sci. **57** (14–15), 2132 (2009).
23. C. Lue, J. S. Halekas, A. R. Poppe, and J. P. McFadden, J. Geophys. Res. Space Physics **123** (7), 5289 (2018).
24. Y. Saito, S. Yokota, T. Tanaka, K. Asamura, et al., Geophys. Res. Letters **35**(24), id. L24205 (2008).
25. A. Bhardwaj, M. B. Dhanya, A. Alok, S. Barabash, et al., Geoscience Letters **2**, id. 10 (2015).
26. M. Hapgood, Ann. Geophysicae **25**, 2037 (2007).
27. Y. Asano, I. Shinohara, A. Retinó, P. W. Daly, et al., J. Geophys. Res. Space Physics **115** (A5), id. A05215 (2010).
28. J. Váverka, I. Richterová, J. Pavlů, J. Šafránková, and Z. Němeček, Astrophys. J. **825** (2), id. 133 (2016).
29. J. L. Molaro, S. Byrne, and S. A. Langer, J. Geophys. Res. Planets **120**, 255 (2015).
30. D. Vaniman, R. Reedy, G. Heiken, G. Olhoeft, and W. Mendell, Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon, (Cambridge University Press, 1991), pp. 27.
31. J. S. Halekas, G. T. Delory, D. A. Brain, R. P. Lin, et al., Geophys. Res. Letters **34**, 2111 (2007).
32. J. S. Halekas, G. T. Delory, R. P. Lin, T. J. Stubbs, and W. M. Farrell, J. Geophys. Res. Space Physics **114**, 5110 (2009).
33. C. M. Pieters and S. K. Noble, J. Geophys. Res. Planets **121**, 1865 (2016).
34. E. N. Slyuta, Solar System Res. **48**, 330 (2014).
35. H. J. Melosh, Planetary Surface Processes (Cambridge: Cambridge University Press, 2011), Ser.: Cambridge Planetary Science (13).
36. S. I. Popel, A. P. Golub', E. A. Lisin, Y. N. Izvekova, B. Atamaniuk, G. G. Dolnikov, A. V. Zakharov, and L. M. Zelenyi, J. Physics Conf. Ser. **774** (1), id. 012175 (2016).
37. S. I. Popel, A. P. Golub', A. V. Zakharov, and L. M. Zelenyi, Plasma Phys. Rep. **46** (3), 265 (2020).
38. I. V. Nemtchinov, V. V. Shuvalov, N. A. Artemieva, I. B. Kosarev, and S. I. Popel, Intern. J. Impact Engineering **27**, 521 (2002).
39. А. Н. Колмогоров, Докл. АН СССР **31** (2), 99 (1941).
40. V. V. Adushkin, L. M. Pernik, and S. I. Popel, Doklady Earth Sciences **415**, 820 (2007). <https://doi.org/10.1134/S1028334X07050352>
41. W. M. Farrell, T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, G. T. Delory, and J. S. Halekas, Geophys. Res. Letters **34** (14), id. L14201 (2007).
42. W. M. Farrell, T. J. Stubbs, J. S. Halekas, G. T. Delory, M. R. Collier, R. R. Vondrak, and R. P. Lin, Geophys. Res. Letters **35** (5), id. L05105 (2008).
43. W. M. Farrell, T. J. Stubbs, G. T. Delory, R. R. Vondrak, M. R. Collier, J. S. Halekas, and R. P. Lin, Geophys. Res. Letters **35** (19), id. L19104 (2008).
44. N. Borisov and U. Mall, Planet. Space Sci. **54**, 572 (2006).
45. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and B. Atamaniuk, Phys. Plasmas **22** (12), id. 123701 (2015).
46. R. H. Manka, Astrophys. Space Sci. Library **37**, 347 (1973). https://doi.org/10.1007/978-94-010-2647-5_22
47. E. C. Whipple, Reports Progress Phys. **44** (11), 1197 (1981).

48. R. F. Willis, M. Anderegg, B. Feuerbacher, and B. Fitton, in *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space*, Proc. of the 6th ESLAB Symposium, held in Noordwijk, September 26–29, 1972 (Dordrecht: Reidel), edited by R. J. L. Gard, *Astrophys. Space Sci. Library* **37**, 389 (1973).
49. B. Feuerbacher, M. Anderegg, B. Fitton, L. D. Laude, R. F. Willis, and R. J. L. Gard, *Proc. of Lunar and Planetary Science Conference* **3**, 2655 (1972).
50. T. J. Stubbs, W. M. Farrell, J. S. Halekas, J. K. Burchill, et al., *Planet. Space Sci.* **90**, 10 (2014).
51. G. R. Olhoeft, A. L. Frisillo, D. W. Strangway, and H. Sharpe, *Moon* **9**, 79 (1974).
52. J. W. Freeman and M. Ibrahim, *Moon* **14**, 103 (1975).
53. S. F. Singer and E. H. Walker, *Icarus* **1**, 112 (1962).
54. D. R. Criswell, *Astrophys. Space Sci. Library* **37**, 545 (1973).
55. J. J. Rennilson and D. R. Criswell, *Moon* **10**, 121 (1974).
56. D. R. Criswell and B. R. De, *J. Geophys. Res.* **82**, 999 (1977).
57. T. Nitter and O. Havnes, *Earth, Moon, and Planets* **56**, 7 (1992).
58. T. Nitter, T. K. Aslaksen, F. Melandso, and O. Havnes, *IEEE Transactions on Plasma Science* **22** (2), 159 (1994).
59. S. Doe, J. Burns, D. Pettit, J. Blacic, and P. Keaton, in *Engineering, Construction, and Operations in Space*, Amer. Soc. of Civ. Eng. (New York), p. 907 (1994).
60. T. Nitter, O. Havnes, and F. Melandso, *J. Geophys. Res. Space Physics* **103** (A4), 6605 (1998).
61. A. A. Sickafoose, J. E. Colwell, M. Horányi, and S. Robertson, *J. Geophys. Res. Space Physics* **107** (A11), id. 1408 (2002).
62. L. J. Spitzer, *Astrophys. J.* **93**, 369 (1941).
63. D. A. Mendis and M. Rosenberg, **32**, 419 (1994).
64. N. Borisov and U. Mall, *J. Plasma Phys.* **67**, 277 (2002).
65. Ф. Чен, *Введение в физику плазмы* (М.: Мир, 1987).
66. C. A. Dukes and R. A. Baragiola, *Planet. Space Sci.* **89**, 36 (2013).
67. E. Walbridge, *J. Geophys. Res.* **78**, 3668 (1973).
68. P. Lee, *Icarus* **124**, 181 (1996).
69. N. D. Borisov and A. V. Zakharov, *Solar System Res.* **48**, 22 (2014).
70. M. S. Robinson, P. C. Thomas, J. Veverka, S. Murchie, and B. Carcich, *Nature* **413** (6854), 396 (2001).
71. N. Thomas, B. Davidsson, M. R. El-Maarry, S. Fornasier, et al., *Astron. and Astrophys.* **583**, id. A17 (2015).
72. B. A. Smith, L. Soderblom, R. Beebe, J. Boyce, et al., *Science* **212**, 163 (1981).
73. B. A. Smith, L. Soderblom, R. Batson, P. Bridges, et al., *Science* **215**, 504 (1982).
74. D. A. Mendis and M. Horányi, *Rev. Geophys.* **51**, 53 (2013).
75. T. A. Nordheim, G. H. Jones, J. S. Halekas, E. Roussos, and A. J. Coates, *Planet. Space Sci.* **119**, 24 (2015).
76. A. J. Coates, *Adv. Space Research* **33**, 1977 (2004).
77. K. Szegő, K. H. Glassmeier, R. Bingham, A. Bogdanov, et al., *Space Sci. Rev.* **94**, 429 (2000).
78. W. H. Ip and W. I. Axford, *Nature* **325** (6103), 418 (1987).
79. A. A. Galeev, T. E. Cravens, and T. I. Gombosi, *Astrophys. J.* **289**, 807 (1985).
80. K.-H. Glassmeier, *Philosophical Transactions Roy. Soc. A: Math., Phys. Engin. Sci.* **375** (2097), id. 20160256 (2017).
81. M. B. Vasil'ev, V. A. Vinogradov, A. S. Vyshlov, O. G. Ivanovskii, et al., *Cosmic Research* **12**, 102 (1974).
82. A. S. Vyshlov, in *Space research XVI*, Proc. of the Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences, May 29 – June 7, 1975, and Symposium and Workshop on Results from Coordinated Upper Atmosphere Measurement Programs, Varna, Bulgaria, May 29–31, 1975 (Berlin, East Germany, Akademie-Verlag GmbH, 1976), p. 945.
83. T. J. Stubbs, D. A. Glenar, W. M. Farrell, R. R. Vondrak, M. R. Collier, J. S. Halekas, and G. T. Delory, *Planet. Space Sci.* **59**, 1659 (2011).
84. J. E. McCoy and D. R. Criswell, in *Lunar Science Conference*, 5th, Houston, Tex., March 18–22, 1974, *Proceedings* **3** (New York: Pergamon Press, Inc., 1974), p. 2991 (1974).
85. H. A. Zook and J. E. McCoy, *Geophys. Res. Letters* **18**, 2117 (1991).
86. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, *Adv. Space Research* **37**, 59 (2006).
87. L. Ksanfomality, S. Murchie, D. Britt, T. Duxbury, et al., *Planet. Space Sci.* **39**, 311 (1991).
88. J. B. Pollack, J. Veverka, K. Pang, D. Colburn, A. L. Lane, and J. M. Ajello, *Science* **199**, 66 (1978).
89. A. G. Duba and J. N. Boland, in *Lunar and Planetary Science VI*, Abstract, p. 232 (1984).
90. A. Zakharov, M. Horányi, P. Lee, O. Witasse, and F. Cipriani, *Planet. Space Sci.* **102**, 171 (2014).
91. S. L. Soter, *Dust Belts of Mars*, Ph. D. thesis, Cornell University, New York (1971).
92. W.-H. Ip and M. Banaszkiewicz, *Geophys. Res. Letters* **17**, 857 (1990).
93. M. Banaszkiewicz and W.-H. Ip, *Icarus* **90**, 237 (1991).
94. K. Kholshchikov, A. Krivov, L. Sokolov, and V. Titov, *Icarus* **105**, 351 (1993).
95. H. Ishimoto and T. Mukai, *Planet. Space Sci.* **42**, 691 (1994).
96. A. Juhász and M. Horányi, *J. Geophys. Res. Planets* **100** (E2), 3277 (1995).
97. A. V. Krivov and D. P. Hamilton, *Icarus* **128**, 335 (1997).
98. N. Divine, *J. Geophys. Res. Planets* **98** (E9), 17029 (1993).
99. A. V. Krivov, A. G. Feofilov, and V. V. Dikarev, *Planet. Space Sci.* **54**, 871 (2006).
100. A. Juhász, M. Tátrallyay, G. Gévai, and M. Horányi, *J. Geophys. Res. Planets* **98**, 1205 (1993).
101. A. V. Krivov, *Astron. and Astrophys.* **291**, 657 (1994).

102. H. Ishimoto, H. Kimura, N. Nakagawa, and T. Mukai, *Adv. Space Research* **19**, 123 (1997).
103. T. C. Duxbury and A. C. Ocampo, *Icarus* **76**, 160 (1988).
104. M. R. Showalter, D. P. Hamilton, and P. D. Nicholson, *Planet. Space Sci.* **54**, 844 (2006).
105. A. V. Bogdanov, *J. Geophys. Res. Space Physics* **86**, 6926 (1981).
106. E. M. Dubinin, R. Lundin, N. F. Pissarenko, S. V. Barabash, A. V. Zakharov, H. Koskinen, K. Schwingenshuh, and Y. G. Yeroshenko, *Geophys. Res. Letters* **17**, 861 (1990).
107. M. Øieroset, D. A. Brain, E. Simpson, D. L. Mitchell, T. D. Phan, J. S. Halekas, R. P. Lin, and M. H. Acuña, *Icarus* **206**, 189 (2010).
108. Y. Futaana, S. Barabash, M. Holmström, H. Nilsson, and R. Lundin, in *European Planetary Science Congress 2009*, held 14–18 September in Potsdam, Germany, p. 701 (2009), <http://meetings.copernicus.org/ep-sc2009>.
109. M. A. Kahre, J. R. Murphy, C. E. Newman, R. J. Wilson, B. A. Cantor, M. T. Lemmon, and M. J. Wolff, in *Asteroids, Comets, Meteors – ACM2017*, edited by R. M. Haberle, R. T. Clancy, F. Forget, M. D. Smith, and R. W. Zurek, p. 229 (2017).
110. O. I. Korablev, V. A. Krasnopolsky, A. V. Rodin, and E. Chassefière, *Icarus* **102**, 76 (1993).
111. V. I. Moroz, V. V. Kerzhanovich, and V. A. Krasnopol'skiy, *Cosmic Res.* **29**(1), 1 (1991).
112. M. D. Smith, *Ann. Rev. Earth and Planet. Sciences* **36**, 191 (2008).
113. L. Montabone, F. Forget, E. Millour, R. J. Wilson, et al., *Icarus* **251**, 65 (2015).
114. L. Montabone, A. Spiga, D. M. Kass, A. Kleinböhl, F. Forget, and E. Millour, *J. Geophys. Res. Planets* **125** (8), id. e06111 (2020).
115. T. Kuroda, A. S. Medvedev, P. Hartogh, and M. Takahashi, *Geophys. Res. Letters* **35** (23), id. L23202 (2008).
116. C. E. Newman and M. I. Richardson, *Icarus* **257**, 47 (2015).
117. M. A. Kahre, J. L. Hollingsworth, R. M. Haberle, and R. J. Wilson, *Icarus* **260**, 477 (2015).
118. L. Neary and F. Daerden, *Icarus* **300**, 458 (2018).
119. M. Rapp and F.-J. Lübken, *Atmospheric Chemistry and Physics* **4**, 2601 (2004).
120. U. von Zahn, G. Baumgarten, U. Berger, J. Fiedler, and P. Hartogh, *Atmospheric Chemistry and Physics* **4**, 2449 (2004).
121. B. A. Klumov, G. E. Morfill, and S. I. Popel, *J. Experim. Theor. Phys.* **100**, 152 (2005).
122. B. A. Klumov, S. I. Popel, and R. Bingham, *J. Experim. Theor. Phys. Letters* **72**, 364 (2000).
123. А. В. Гуревич, А. Г. Литвак, А. Л. Вухарев, О. А. Иванов, Н. Д. Борисов, К. Ф. Сергейчев, *УФН* **170**, 1181 (2000).
124. Г. А. Аскаръян, Г. М. Батанов, И. А. Косый, А. Ю. Костинский, *Докл. АН СССР* **302** (3), 566 (1988).
125. A. N. Simonenko, in *Physics and Dynamics of Meteors*, IAU Symp. No. 33 held at Tatranska Lomnica, Czechoslovakia, 4–9 September 1967, edited by L. Kresak and P. M. Millman (Dordrecht: D. Reidel, 1968), p. 207.
126. S. Okuzumi, *Astrophys. J.* **698**, 1122 (2009).
127. M. Horányi and C. K. Goertz, *Astrophys. J.* **361**, 155 (1990).
128. M. V. Gerasimov, B. A. Ivanov, O. I. Yakovlev, and Y. P. Dikov, *Earth, Moon and Planets* **80** (1), 209 (1998).
129. М. А. Зайцев, М. В. Герасимов, Э. Н. Сафонова, А. С. Васильева, *Астрон. вестн.* **50** (2), 123 (2016).
130. Т. И. Морозова, С. И. Попель, *Физика плазмы* **48** (7), 635 (2022).
131. J. Dorschner and T. Henning, *Astron. and Astrophys. Rev.* **6**, 271 (1995).
132. G. E. Ciolek, in *The Physics of the Interstellar Medium and Intergalactic Medium*, held at Italy, June 20–24, 1994; edited by A. Ferrara, C. F. McKee, C. Heiles, and P. R. Shapiro (San Francisco, California: Astron. Soc. Pacific, 1995), ASP Conf. Ser. **80**, 174.
133. E. F. van Dishoeck, G. A. Blake, B. T. Draine, and J. I. Lunine, in *Protostars and Planets III*, edited by E. H. Levy and J. I. Lunine (Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 1993), p. 163.
134. C. P. Endres, S. Schlemmer, P. Schilke, J. Stutzki, and H. S. Müller, *J. Molecular Spectroscopy* **327**, 95 (2016).
135. A. Dalgarno and J. H. Black, *Reports Progress Phys.* **39**, 573 (1976).
136. C. M. Leung, E. Herbst, W. F. Huebner, C. M. Leung, E. Herbst, and W. F. Huebner, *Astrophys. J. Suppl.* **56**, 231 (1984).
137. L. B. D'Hendecourt, L. J. Allamandola, and J. M. Greenberg, *Astron. and Astrophys.* **152**, 130 (1985).
138. P. D. Brown and S. B. Charnley, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **244**, 432 (1990).
139. T. Albertsson, D. A. Semenov, A. I. Vasyunin, T. Henning, and E. Herbst, *Astrophys. J. Suppl.* **207**, 27 (2013).
140. D. McElroy, C. Walsh, A. J. Markwick, M. A. Cordiner, K. Smith, and T. J. Millar, *Astron. and Astrophys.* **550**, id. A36 (2013).
141. T. Grassi, S. Bovino, D. R. G. Schleicher, J. Prieto, D. Seifried, E. Simoncini, and F. A. Gianturco, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **439** (3), 2386 (2014), arXiv:1311.1070 [astro-ph.GA]1311.1070.
142. O. Biham, I. Furman, V. Pirronello, and G. Vidali, *Astrophys. J.* **553**, 595 (2001).
143. S. B. Charnley, *Astrophys. J.* **562**, L99 (2001).
144. A. Lipshtat and O. Biham, *Phys. Rev. Letters* **93**, id. 170601 (2004).
145. T. Stantcheva and E. Herbst, *Astron. and Astrophys.* **423**, 241 (2004).
146. Q. Chang, H. M. Cuppen, and E. Herbst, *Astron. and Astrophys.* **434**, 599 (2005).
147. T. Garrod, *Astron. and Astrophys.* **491**, 239 (2008).

148. A. I. Vasyunin and E. Herbst, *Astrophys. J.* **762**, id. 86 (2012).
149. V. Buch and R. Czerminski, *J. Chemical Physics* **95**, 6026 (1998).
150. A. Al-Halabi, R. Bianco, and J. T. Hynes, *J. Chemical Physics A* **106**, 7639 (2002).
151. A. Al-Halabi, A. W. Kleyn, E. F. van Dishoeck, M. C. van Hemert, and G. J. Kroes, *J. Chemical Physics A* **49**, 10615 (2003).
152. A. Al-Halabi, H. J. Fraser, G. J. Kroes, and E. F. van Dishoeck, *Astron. and Astrophys.* **422**, 777 (2004).
153. V. K. Veeraghatham, K. Manrodt, S. P. Lewis, and P. C. Stancil, *Astrophys. J.* **790**, id. 4 (2014).
154. E. R. Batista, P. Ayotte, A. Bilić, B. D. Kay, and H. Jónsson, *Phys. Rev. Letters* **95**, 223201 (2005).
155. Molecules [CDMS classic documentation], <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>.
156. E. Herbst and E. F. V. Dishoeck, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 427 (2009).
157. C. Ceccarelli, P. Caselli, F. Fontani, R. Neri, et al., *Astrophys. J.* **850**, id. 176 (2017), arXiv:1710.10437 [astro-ph.SR].
158. L. Testi, T. Birnstiel, L. Ricci, S. Andrews, et al., *Protostars and Planets VI*, edited by H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning (Tucson: University of Arizona Press, 2014), p. 339.
159. K. Wada, H. Tanaka, S. Okuzumi, H. Kobayashi, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto, *Astron. and Astrophys.* **559**, id. A62 (2013).
160. K. Wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto, *Astrophys. J.* **702**, 1490 (2009).
161. J. F. Gonzalez, G. Laibe, and S. T. Maddison, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **467**, 1984 (2017).
162. B. S. Hensley and B. T. Draine, arXiv:2208.12365 [astro-ph.GA] (2022).
163. J. S. Mathis, W. Rumpl, and K. H. Nordsieck, *Astrophys. J.* **217**, 425 (1977).
164. B. T. Draine and H. M. Lee, *Astrophys. J.* **285**, 89 (1984).
165. J. Weingartner and B. Draine, *Astrophys. J.* **548**, 296 (2001).
166. S. Wang, A. Li, and B. W. Jiang, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **454**, 569 (2015).
167. D. C. Morton, J. F. Drake, E. B. Jenkins, J. B. Rogerson, L. Spitzer, and D. G. York, *Astrophys. J.* **181**, L103 (1973).
168. B. S. Hensley and B. T. Draine, *Astrophys. J.* **906**, id. 73 (2021).
169. R. Gehr, in *Interstellar Dust*, Proc. of the 135th Symp. of the IAU, held in Santa Clara, California, 26–30 July 1988, edited by L. J. Allamandola and A. G. G. M. Tielens (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989), p. 445.
170. C. McKee, in *Interstellar Dust*, Proc. of the 135th Symp. of the IAU, held in Santa Clara, California, 26–30 July 1988, edited by L. J. Allamandola and A. G. G. M. Tielens (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989), p. 431.
171. R. Tazaki, K. Ichikawa, and M. Kokubo, *Astrophys. J.* **892**, id. 84 (2020).
172. A. P. Jones, A. G. G. M. Tielens, D. J. Hollenbach, and C. F. McKee, *Astrophys. J.* **433**, 797 (1994).
173. K. M. Douglas, M. A. Blitz, W. Feng, D. E. Heard, J. M. Plane, H. Rashid, and P. W. Seakins, *Icarus* **321**, 752 (2019).
174. M. Minissale, Y. Aikawa, E. Bergin, M. Bertin, et al., *Amer. Chemical Soc. Earth and Space Chemistry* **6** (3), 597 (2022).
175. T. E. Sheridan, J. Goree, Y. T. Chiu, R. L. Rairden, and J. A. Kiessling, *J. Geophys. Res. Space Physics* **97**, 2935 (1992).
176. T. M. Flanagan and J. Goree, *Phys. Plasmas* **13**, 123504 (2006).
177. T. E. Sheridan and A. Hayes, *App. Phys. Letters* **98** (9), id. 091501 (2011), arXiv:1102.1986 [physics.plasm-ph].
178. C. M. Hartzell and D. J. Scheeres, *Planet. Space Sci.* **59**, 1758 (2011).
179. T. E. Sheridan, *J. Appl. Phys.* **113** (14), id. 143304 (2013).
180. X. Wang, J. Schwan, H.-W. Hsu, E. Grün, and M. Horányi, *Geophys. Res. Letters* **43**, 6103 (2016).
181. E. V. Rosenfeld and A. V. Zakharov, *Icarus* **338**, id. 113538 (2020).
182. X. Wang, J. Schwan, N. Hood, H.-W. Hsu, E. Grün, and M. Horányi, *J. Visualized Experiments* **2018**, id. e57072 (2018), <https://www.jove.com/v/57072/experimental-methods-dust-charging-mobilization-on-surfaces-with>.
183. A. Shu, A. Collette, K. Drake, E. Grün, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **83**, id. 075108 (2012).
184. I. A. Kuznetsov, S. L. G. Hess, A. V. Zakharov, F. Cipriani, et al., *Planet. Space Sci.* **156**, 62 (2018).
185. I. Langmuir, C. G. Found, and A. F. Dittmer, *Science (New York)* **60**, 392 (1924).
186. H. Ikezi, *Phys. Fluids* **29**, 1764 (1986).
187. J. H. Chu and I. Lin, *Phys. Rev. Letters* **72**, 4009 (1994).
188. H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Möhlmann, *Phys. Rev. Letters* **73**, 652 (1994).
189. A. Melzer, T. Trottenberg, and A. Piel, *Phys. Letters A* **191**, 301 (1994).
190. Y. Hayashi and K. Tachibana, *Japanese J. Appl. Phys.* **33**, L804 (1994).
191. A. Shu, S. Bugiel, E. Grün, J. Hillier, M. Horányi, T. Munst, and R. Srama, *Planet. Space Sci.* **89**, 29 (2013).
192. J. K. Hillier, Z. Sternovsky, S. Kempf, M. Trieloff, M. Guglielmino, F. Postberg, and M. C. Price, *Planet. Space Sci.* **156**, 96 (2018).
193. L. Nouzák, S. Hsu, D. Malaspina, F. M. Thayer, et al., *Planet. Space Sci.* **156**, 85 (2018).
194. J. I. Samaniego, X. Wang, L. Andersson, D. Malaspina, R. E. Ergun, and M. Horányi, *J. Geophys. Res. Space Physics* **123**, 6054 (2018).
195. N. Hood, A. Carroll, R. Mike, X. Wang, J. Schwan, H. W. Hsu, and M. Horányi, *Geophys. Res. Letters* **45** (24), 13.206 (2018).

196. *N. C. Orger, K. Toyoda, H. Masui, and M. Cho*, Adv. Space Research **63**, 3270 (2019).
197. *A. Champlain, J. C. Matéo-Vélez, J. F. Roussel, S. Hess, P. Sarrailh, G. Murat, J. P. Chardon, and A. Gajan*, J. Geophys. Res. Space Physics **121**, 103 (2016).
198. *I. Cermak, E. Gruen, and J. Svestka*, Adv. Space Research **15**, 59 (1995).
199. *N. D'Angelo*, J. Physics D: Appl. Phys. **28**, 1009 (1995).
200. *A. Barkan, N. D'Angelo, and R. Merlino*, Planet. Space Sci. **44**, 239 (1996).
201. *M. Schwabe, S. K. Zhdanov, H. M. Thomas, A. V. Ivlev, et al.*, New J. Physics **10**, id. 033037 (2008).
202. *A. Barkan, R. L. Merlino, and N. D'Angelo*, Phys. Plasmas **2**, 3563 (1995).
203. *B. Tadsen, F. Greiner, S. Groth, and A. Piel*, Phys. Plasmas **22**, id. 113701 (2015).
204. *T. Deka, A. Boruah, S. K. Sharma, and H. Bailung*, Phys. Plasmas **24**, id. 093706 (2017).
205. *S. V. Annibaldi, A. V. Ivlev, U. Konopka, S. Ratynskaia, et al.*, New J. Physics **9**, 327 (2007).
206. *J. Goree, B. Liu, M. Y. Pustyl'nik, H. M. Thomas, et al.*, Phys. Plasmas **27**, id. 123701 (2020).
207. *M. Schwabe, S. A. Khrapak, S. K. Zhdanov, M. Y. Pustyl'nik, et al.*, New J. Physics **22**, id. 083079 (2020).
208. *E. Thomas, R. Fisher, and R. L. Merlino*, Phys. Plasmas **14**, id. 123701 (2007).
209. *J. D. Williams*, Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **89**, id. 023105 (2014).
210. *R. L. Merlino*, J. Plasma Phys. **80**, 773 (2014).
211. *M. Schwabe, M. Rubin-Zuzic, S. Zhdanov, H. M. Thomas, and G. E. Morfill*, Phys. Rev. Letters **99**, id. 095002 (2007).
212. *C.-T. Liao, L.-W. Teng, C.-Y. Tsai, C.-W. Io, and I. Lin*, Phys. Rev. Letters **100**, id. 185004 (2008).
213. *T. Trottenberg, D. Block, and A. Piel*, Phys. Plasmas **13**, id. 042105 (2006).
214. *J. D. Williams, E. Thomas, and L. Marcus*, Phys. Plasmas **15**, id. 043704 (2008).
215. *I. Pilch, T. Reichstein, and A. Piel*, Phys. Plasmas **16**, id. 123709 (2009).
216. *E. Thomas*, Phys. Plasmas **17**, id. 043701 (2010).
217. *L. W. Teng, M. C. Chang, Y. P. Tseng, and I. Lin*, Phys. Rev. Letters **103**, id. 245005 (2009).
218. *P. K. Shukla and L. I.*, Phys. Letters A **374**, 1165 (2010).
219. *S. K. Sharma, A. Boruah, Y. Nakamura, and H. Bailung*, Phys. Plasmas **23**, id. 053702 (2016).
220. *K. O. Menzel, O. Arp, and A. Piel*, Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **84**, id. 016405 (2011).
221. *K. O. Menzel, O. Arp, and A. Piel*, Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **83**, id. 016402 (2011).
222. *J. Pramanik, B. M. Veeresha, G. Prasad, A. Sen, and P. K. Kaw*, Phys. Letters A **312**, 84 (2003).
223. *Y. Y. Tsai, M. C. Chang, and L. I.*, Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **86**, id. 045402 (2012).
224. *A. Melzer, H. Krüger, S. Schütt, and M. Mulsow*, Phys. Plasmas **27**, id. 033704 (2020).
225. *A. Melzer, H. Krüger, D. Maier, and S. Schütt*, Rev. Modern Plasma Physics **5**, 11 (2021).
226. *Y. Watanabe*, J. Physics D: Appl. Phys. **39**, 329 (2006).
227. *J. Berndt, E. Kovačević, I. Stefanović, O. Stepanović, S. H. Hong, L. Boufendi, and J. Winter*, Contrib. Plasma Phys. **49**, 107 (2009).
228. *S. Groth, F. Greiner, and A. Piel*, Plasma Sources Sci. Technol. **28**, id. 115016 (2019).
229. *B. Chutia, T. Deka, Y. Bailung, S. K. Sharma, and H. Bailung*, Phys. Plasmas **28**, id. 063703 (2021).
230. *B. Chutia, T. Deka, Y. Bailung, D. Sharma, S. K. Sharma, and H. Bailung*, Phys. Plasmas **28**, id. 123702 (2021).
231. *Y. A. Ussenov, E. von Wahl, Z. Marvi, T. S. Ramazanov, and H. Kersten*, Vacuum **166**, 15 (2019).
232. *S. Orzabayev, Y. Yerlanuly, A. Utegenov, Z. Moldabekov, M. Gabdullin, and T. Ramazanov*, Nanotechnology **32**, id. 455602 (2021).
233. *W. Don, S. Ruhunusiri, and J. Goree*, IEEE Transactions on Plasma Science **42**, 2688 (2014).
234. *J. M. Harper, G. Gogia, B. Wu, Z. Laseter, and J. C. Burton*, Phys. Rev. Res. **2**, id. 033500 (2020).
235. *A. V. Zakharov, A. Y. Poroykov, S. A. Bednyakov, A. N. Lyash, I. A. Shashkova, I. A. Kuznetsov, and G. G. Dolnikov*, Measurement **171**, id. 108831 (2021).
236. *В. Е. Форттов, А. П. Неведов, О. С. Ваулина, А. М. Лунаев, и др.*, ЖЭТФ **114**, 2004 (1998).
237. *А. П. Неведов, О. С. Ваулина, А. М. Лунаев, В. И. Молотков, и др.*, ЖЭТФ **122**, 778 (2002).
238. *A. P. Nefedov, G. E. Morfill, V. E. Fortov, H. M. Thomas, et al.*, New J. Physics **5**, 33 (2003).
239. *A. G. Khrapak, V. I. Molotkov, A. M. Lipaev, D. I. Zhukhovitskii, et al.*, Contrib. Plasma Phys. **56**, 253 (2016).
240. *A. V. Ivlev, G. E. Morfill, H. M. Thomas, C. Rätth, et al.*, Phys. Rev. Letters **100**, id. 095003 (2008).
241. *S. Khrapak, P. Huber, H. Thomas, V. Naumkin, V. Molotkov, and A. Lipaev*, Phys. Rev. E **99**, id. 053210 (2019).
242. *S. F. Savin, L. G. D'yachkov, M. M. Vasil'ev, O. F. Petrov, and V. E. Fortov*, Technical Phys. Letters **35**, 1144 (2009).
243. *S. F. Savin, L. G. D'yachkov, M. I. Myasnikov, O. F. Petrov, et al.*, JETP Letters **94**, 508 (2011).
244. *O. F. Petrov, M. I. Myasnikov, L. G. D'yachkov, M. M. Vasiliev, et al.*, Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **86**, id. 036404 (2012).
245. *M. Y. Pustyl'nik, M. A. Fink, V. Nosenko, T. Antonova, et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, id. 093505 (2016).
246. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, A. M. Lipaev, O. F. Petrov, et al.*, J. Physics Conf. Ser. **774**, id. 012174 (2016).
247. *S. Mitic, M. Y. Pustyl'nik, D. Erdle, A. M. Lipaev, et al.*, Phys. Rev. E **103**, id. 063212 (2021).
248. *S. Jaiswal, M. Y. Pustyl'nik, S. Zhdanov, H. M. Thomas, et al.*, Phys. Plasmas **25**, id. 083705 (2018).

249. *V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. A. Sinel'shchikov, A. D. Usachev, and A. V. Zobnin*, Phys. Letters A **267**, 179 (2000).
250. *R. E. Boltnev, M. M. Vasiliev, E. A. Kononov, and O. F. Petrov*, JETP **126**, 561 (2018).
251. *R. E. Boltnev, M. M. Vasiliev, E. A. Kononov, and O. F. Petrov*, Sci. Rep. **9**, id. 3261 (2019).
252. *M. M. Vasiliev, L. G. D'yachkov, S. N. Antipov, R. Huijink, O. F. Petrov, and V. E. Fortov*, Euro Physics Letters **93**, id. 15001 (2011).
253. *O. F. Petrov, F. M. Trukhachev, M. M. Vasiliev, and N. V. Gerasimenko*, JETP **126**, 842 (2018).
254. *M. M. Vasiliev, S. N. Antipov, and O. F. Petrov*, J. Physics A: Mathematical and General **39**, 4539 (2006).
255. *E. A. Lisin, E. A. Kononov, E. A. Sametov, M. M. Vasiliev, and O. F. Petrov*, Molecules **26**, 7535 (2021).
256. *O. S. Vaulina, E. A. Lisin, A. V. Gavrikov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov*, Phys. Rev. Letters **103**, id. 035003 (2009).
257. *E. A. Lisin, R. A. Timirkhanov, O. S. Vaulina, O. F. Petrov, and V. E. Fortov*, New J. Physics **15**, id. 53004 (2013).
258. *O. F. Petrov, M. M. Vasiliev, O. S. Vaulina, K. B. Stacenko, E. V. Vasilieva, E. A. Lisin, Y. Tun, and V. E. Fortov*, Euro Physics Letters **111**, id. 45002 (2015).
259. *E. A. Kononov, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov, and E. V. Vasilieva*, Nanomaterials **11**, 2931 (2021).
260. *I. Kuznetsov, I. Shashkova, A. Poroykov, A. Zakharov, et al.*, Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proc. of the BAK-2021 conference, held 23–28 August, 2021 in Moscow, p. 246, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022aems.conf..246K/abstract>.
261. *E. Mullikin, H. Anderson, N. O'Hern, M. Farrah, et al.*, Astrophys. J. **910**, id. 72 (2021).
262. *J. C. Santos, K.-J. Chuang, T. Lamberts, G. Fedoseev, S. Ioppolo, and H. Linnartz*, Astrophys. J. Letters **931**, id. L33 (2022).
263. *D. Qasim, G. Fedoseev, K. J. Chuang, J. He, S. Ioppolo, E. F. van Dishoeck, and H. Linnartz*, Nature Astron. **4**, 781 (2020).
264. *Н. Н. Скворцова, Д. В. Малахов, В. Д. Степахин, С. А. Майоров, и др.*, Письма в ЖЭТФ **106** (4) 240 (2017).