

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ: БЕЗАТМОСФЕРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛА

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

^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Приведен краткий обзор исследований по пылевой плазме в Солнечной системе. Особое внимание уделяется теоретическим исследованиям, касающимся безатмосферных тел Солнечной системы, проводимым в Институте космических исследований РАН.

Ключевые слова: пылевая плазма, Солнечная система, кометы, Меркурий, Луна, Фобос, Деймос

DOI: 10.31857/S0367292123600437, **EDN:** HZLIWW

ВВЕДЕНИЕ

Трудно представить себе заполненную плазмой область Солнечной системы, свободную от пылевых частиц [1]. Нано- и микромасштабные пылевые частицы обнаруживаются в межпланетном космическом пространстве, в плазме ионосфер и магнитосфер планет, в планетарных кольцах, в окрестностях космических тел, не имеющих собственной атмосферы, таких как Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др. Пожалуй, есть лишь одно исключение из этого правила — собственно Солнце и область в непосредственной близости от него, где из-за высоких температур пыль существовать не может. В результате взаимодействия пылевых частиц с электронами и ионами окружающей плазмы, а также под действием солнечного излучения они приобретают электрические заряды и становятся одной из важных составляющих плазмы, существенно влияющей на ее свойства и динамику.

В планетологии нано- и микроразмерные компоненты выступают в качестве основных элементов структуры космических тел, поэтому исследования природных нано- и микроразмерных пылевых объектов могут привести к расширению наших представлений о фундаментальных процессах геологии и планетообразования [2]. Так, например, протопланетная пыль имеет размеры от 10 нм до 150 нм. Она относится к хондритам класса С1. Если провести дифференциацию углистых хондритов, получаются минералы, входящие в состав мантии Земли. Можно сделать вывод, что, по крайней мере, планеты земной группы Солнечной системы произошли из нано-

масштабных частиц, состав которых отвечает углистым хондритам. Есть серьезные аргументы в пользу предположения, что Солнечная система в свое время сформировалась из плазмы, содержащей заряженные пылевые частицы [3]. Таким образом, изучение мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой плазмы в Солнечной системе, ионосферах и магнитосферах планет может дать новую информацию о межзвездном веществе, механизмах планетообразования и т.д.

Интерес к описанию пылевой космической плазмы резко возрос в конце 1990-х гг., что было связано с разработкой к этому времени теоретических методов исследования пылевой плазмы, в том числе и в природных системах [4]. В XXI в. существенно усилился интерес и к непосредственному изучению космических пылевых частиц. Была организована миссия НАСА “Stardust” (“Звездная пыль”), среди основных целей которой был сбор и доставка на Землю частиц из окрестностей ядра кометы 81P/Wild 2, что было успешно реализовано 15 января 2006 г., когда капсула с образцами кометного вещества вернулась на Землю [5]. В американской миссии LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer”) — “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды” [6], реализованной в 2013–2014 гг., лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты. Происхождение пылевых частиц у лунной поверхности, потоки которых измерялись в рамках лунной миссии KHP Chang’E-3 анализировалось в [7]. В России готовятся миссии “Луна-25” и “Луна-27” [8, 9], в рамках которых будут исследоваться свойства пыли и пылевой плазмы у поверхности Луны (рис. 1).

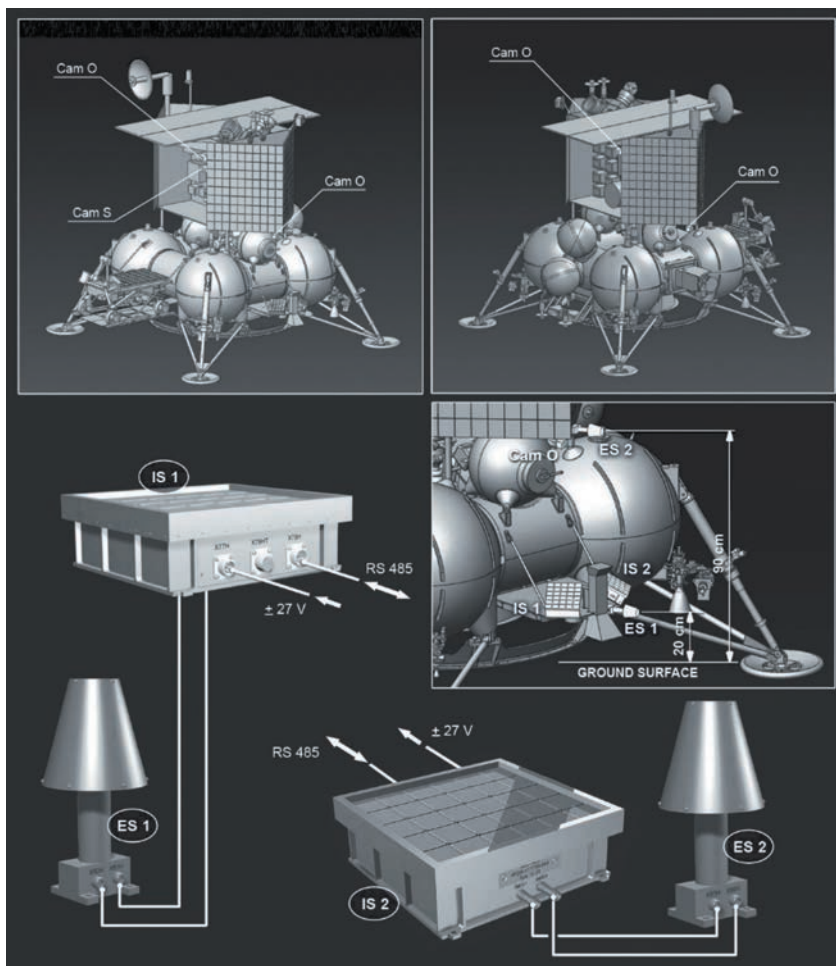


Рис. 1. Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станциях “Луна-25 и -27”. Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и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

В настоящей работе приводится краткий обзор исследований, касающихся пыли и пылевой плазмы в Солнечной системе. Особое внимание уделяется теоретическим исследованиям, касающимся безатмосферных тел Солнечной системы, проводимым в Институте космических исследований РАН.

КОМЕТНАЯ ПЫЛЬ

Источником мелких частиц, заполняющих Солнечную систему, служат разрушающиеся ядра комет и столкновения тел в поясе астероидов [10]. Высвобождение пыли при разрушении ядер комет происходит следующим образом. Приближаясь к Солнцу, комета обычно приобретает характерную структуру: видимый гигантский хвост, ядро (как правило, невидимое) очень маленького размера по сравнению с хвостом, а также атмосферу, окружающую ядро и называемую комой

кометы. Кома и хвост формируются как следствие истечения вещества из ядра кометы. В ядре ледяные слои из замороженных газов чередуются с пылевыми слоями. По мере прогревания солнечным излучением образующиеся в результате возгонки газы вытекают наружу, увлекая за собой облака пыли. В результате ядро кометы становится источником газопылевого потока, движущегося (вслед за ядром) навстречу солнечному ветру.

На рис. 2 представлена фотография кометы Хейла–Боппа [11]. На ней видны два хвоста кометы, четко разделенные в плоскости неба. Верхний хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону, образуют, главным образом, увлекаемые солнечным ветром ионы CO^+ , которые и придают голубой оттенок цвету этого хвоста. В нижнем (белом) хвосте летят пылевые частицы размером около 1 мкм. Пыль из ядра и комы кометы отбрасывается назад силой светового



Рис. 2. Фотография кометы Хейла–Боппа [11]. Верхний хвост кометы состоит в основном из ионов CO^+ , нижний — из пылевых частиц размером ~ 1 мкм.

давления Солнца. Однако из-за достаточно больших масс пылевых частиц, на их движении существенным образом сказываются инерция и солнечная гравитация. Поэтому нижний (пылевой) хвост кометы отклонен в сторону от верхнего (ионного) хвоста. Во время съемки комета выделяла газ и пыль со скоростью около 200 т в секунду.

Исследования пылевых частиц вблизи кометы Галлея, а также частиц из микрократеров на Луне, потоков метеоров, межпланетных пылевых частиц, собранных космическими аппаратами, позволили получить [12] параметры, которые широко используются для исследования зарядки и динамики пылевых частиц в магнитосфере Земли и Солнечной системе (см., например, [13]). Размеры и плотности микромасштабных пылевых частиц по данным работы [12] приведены в табл. 1.

Впервые исследование частиц пыли кометного происхождения в земных условиях удалось провести в рамках уже упоминавшейся миссии “Stardust”. Основной целью миссии был сбор кометной пыли с последующей доставкой образцов на Землю. На некоторых участках траектории космического аппарата “Stardust” собирались также образцы межпланетной пыли. Пыль захватывалась заполненным аэрогелем коллектором,

установленным на космическом аппарате. Когда последний находился в окрестностях ядра кометы 81P/Wild 2 (точка максимального сближения “Stardust” была примерно в 236 км от ядра), в коллекторе оседали пылевые частицы. Затем он был герметично закрыт и спрятан в возвращаемую капсулу, которая в январе 2006 г. вернулась на Землю. После вскрытия капсулы стало ясно: миссия выполнена успешно — аэрогель содержал крупные и мелкие частицы кометного вещества (рис. 3). Исследование частиц показало, что их размеры варьировались от десятков нанометров до десятых долей миллиметра. В среднем они оказались крупнее частиц кометы Галлея.

Плазменно-пылевые процессы могут иметь существенные проявления при формировании головной ударной волны, образующейся вследствие взаимодействия комы кометы с солнечным ветром, а также в ситуациях, когда комета находится далеко от Солнца.

1. Головную ударную волну иногда можно трактовать как разновидность ионно-звуковой ударной волны [14]. Присутствие заряженной пыли приводит к еще одному важному виду взаимодействия — взаимодействию протонов солнечного ветра с пылевыми частицами в коме кометы. Для типичного ядра кометы с радиусом ядра ~ 1 км и относительно плотной комы (с концентрацией пыли, превосходящей 10^6 см^{-3}) при формировании головной ударной волны важную роль играет аномальная диссипация, обусловленная зарядкой пылевых частиц. Такая головная ударная волна, по-видимому, имеет природу, которая аналогична природе пылевых ионно-звуковых ударных волн [15, 16].

2. Для кометы, характеризующей параметрами ядра, близкими к параметрам ядра кометы Галлея, пылевая плазма в окрестности ядра кометы формируется за счет электростатических взаимодействий, т.е. аналогично формированию пылевой плазмы вблизи других безатмосферных тел (таких, например, как спутники Марса [17, 18]), если расстояние от кометы до Солнца не меньше ~ 3 а.е. Если же комета находится на более близких расстояниях от Солнца, то динамику пылевых частиц определяет газовый поток от ядра кометы.

Таблица 1. Размеры и плотности микрочастиц космической пыли

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

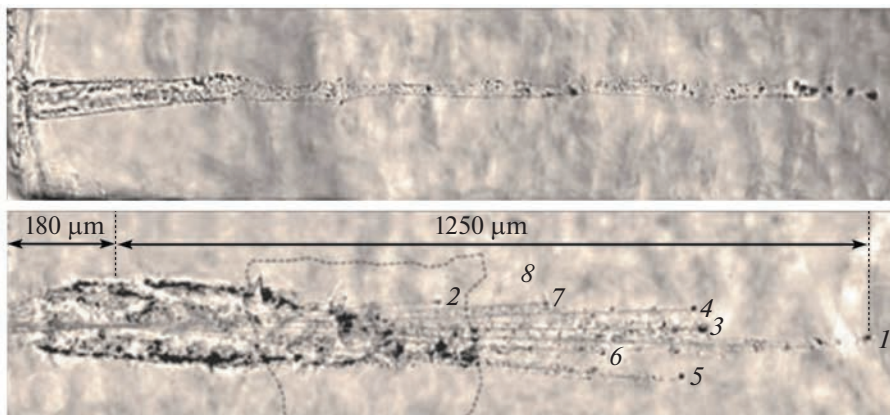


Рис. 3. Фотографии треков от пылевых частиц кометного происхождения в аэрогеле аппарата “Stardust” [5]. Движение частиц происходило слева направо. На верхнем рисунке видно, что твердая частица перемещается без дальнейшей фрагментации. На нижнем рисунке изображена эволюция первоначально слабосвязанного скопления частиц, каждая из которых имеет размер в несколько микрометров.

ЛУННАЯ ПЫЛЬ

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на лунной поверхности составляет несколько сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам астронавтов (рис. 4), поверхностям космических аппаратов, приборам и т.д., что может угрожать работе систем. Так, в частности, на поверхности приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения, что может привести к их перегреву. На скафандрах пыль заносится внутрь лунного модуля, и весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты могут вдыхать ее частицы, присутствующие в состоянии невесомости в воздухе. Таким образом, лунная пыль представляет собой существенный фактор риска и для здоровья астронавтов.



Рис. 4. Астронавт “Apollo-17” Харрисон Шмидт собирает частицы лунного грунта. Нижняя часть его скафандра покрыта пылью.

Существенной мотивацией исследований пыли над поверхностью Луны служат планы создания обитаемой лунной базы, обсуждения которой ведутся достаточно активно. Пыль опасна для участников лунной экспедиции, особенно при попадании в легкие. Если в лунных экспедициях 1960–70-х гг. контакт астронавтов с лунной пылью был короток, то при использовании обитаемых лунных баз проблеме лунной пыли придется решать, чтобы избежать серьезных проблем со здоровьем у участников лунной экспедиции. Кроме того, пыль может представлять опасность и для работы аппаратуры лунной базы.

Во время космических миссий Surveyor и Apollo к Луне было замечено, что солнечный свет рассеивается в области терминатора, а это в свою очередь приводит к формированию лунных зорь и стримеров над лунной поверхностью [19]. Последующие наблюдения показали, что рассеяние света наиболее вероятно происходит на заряженных пылевых частицах, источником которых служит поверхность Луны [20]. На основе данных спускаемых космических аппаратов Surveyor был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами около 5 мкм, могут парить над поверхностью Луны приблизительно в 10 см от поверхности. Выводы о существовании пыли на больших высотах (от 3 до 260 км) можно сделать из наблюдений лунного орбитального аппарата LADEE [6].

В настоящее время фактически считается общепринятым [8, 9], что пыль над лунной поверхностью — составная часть плазменно-пылевой системы (рис. 5). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с излучением лунные породы испускают электроны благодаря фотоэффекту, что приводит к форми-

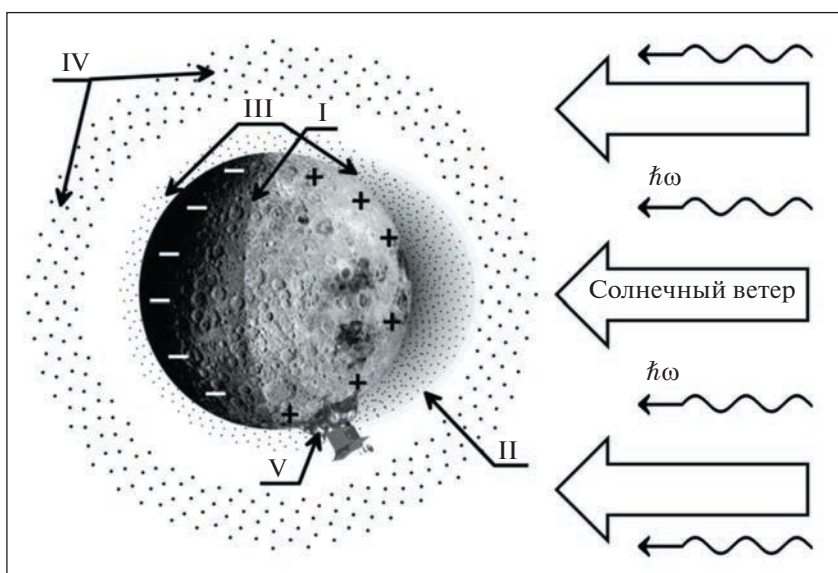


Рис. 5. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ($h\nu$), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в Южной полусфере.

рованию над поверхностью слоя фотоэлектронов. Фотоэлектроны поставляются и пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны (они тоже поглощают солнечный свет). Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, не только испускают, но и поглощают фотоэлектроны, а также фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра; если же Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Рассмотрение плазменно-пылевых процессов у Луны позволяет сделать следующие основные выводы (см., например, [9, 21, 22]).

1. Электростатические процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли. Характерный размер и характерная концентрация заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны при этом определяются, соответственно, значениями порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} [8].

2. С точки зрения отрыва пылевых частиц от лунной поверхности важными являются удары метеороидов. При рассмотрении такого рода процессов следует учитывать адгезию, эффект которой ослабляется, если учитывать шероховатость поверхности. Отличительными особенностями частиц, появляющихся в плазменно-пылевой си-

стеме над поверхностью Луны вследствие ударов метеороидов, являются высокие скорости (большие 10 м/с) и микрометровые размеры [23].

3. Характерное значение напряженности электрического поля в области лунного терминатора, обусловленное плазменно-пылевыми процессами, может достигать значений $E \sim 300 \text{ В/м}$ [24]. При этом пылевые частицы с размерами $2\text{--}3 \text{ мкм}$ могут подняться на высоту около 30 см над поверхностью Луны, что достаточно [19] для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось в рамках миссии Surveyor.

4. Благодаря действию магнитных полей в хвосте магнитосферы Земли возможен перенос частиц заряженной пыли над лунной поверхностью на большие расстояния и, соответственно, пылевая плазма над освещенной Солнцем поверхностью Луны может существовать для всего диапазона лунных широт [25]. Магнитные поля в областях лунных магнитных аномалий могут приводить к изменениям траекторий пылевых частиц. Однако, поскольку характерные размеры областей магнитных аномалий составляют всего несколько десятков километров, общая тенденция движения пылевых частиц, обусловленная магнитными полями магнитосферы Луны, сохраняется [26].

5. Отличительной чертой траектории движения пылевой частицы в пылевой плазме над лунной поверхностью является наличие колебаний, процесс затухания которых связан с вариациями

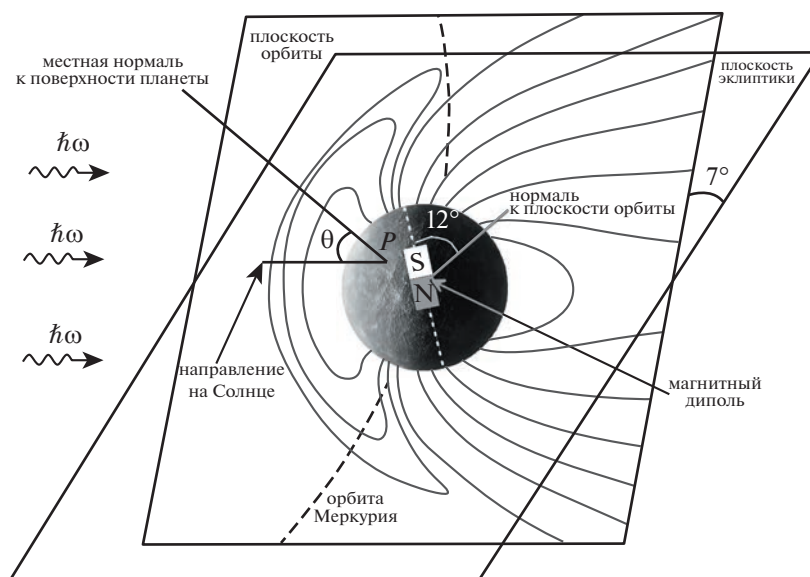


Рис. 6. Схематическое изображение, демонстрирующее плоскость орбиты Меркурия, плоскость эклиптики, магнитный диполь Меркурия (S — южный магнитный полюс диполя, N — северный магнитный полюс диполя), орбиту Меркурия, P — точку наблюдения, направление на Солнце в точке P, местную нормаль к поверхности планеты в точке P. Приведены углы между плоскостью эклиптики и плоскостью орбиты, а также между направлением магнитного диполя и нормалью к плоскости орбиты. Схематически показаны фотоны солнечного ветра $\hbar\omega$ и магнитосфера Меркурия.

зарядов пылевых частиц, что согласуется с представлениями об аномальной диссипации в пылевой плазме. Процессы изменения зарядов пылевых частиц слишком быстрые по сравнению с продолжительностью суток на Луне. В связи с этим, для большинства (~83%) пылевых частиц над освещенной Солнцем лунной поверхностью колебания успевают затухнуть, и эти пылевые частицы можно рассматривать как “левитирующие” [25, 27]. Только очень мелкие частицы не переходят в режим “левитации” в течение всего светлого времени суток на Луне, и при их рассмотрении необходимо учитывать эффекты нестационарности плазменно-пылевой системы над Луной.

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА У МЕРКУРИЯ И СПУТНИКОВ МАРСА

Характер пылевой плазмы у других безатмосферных космических объектов, например, Меркурия или спутников Марса — Фобоса и Деймоса имеет ряд черт, схожих с пылевой плазмой у Луны, но при этом возникают существенные особенности.

В 2018 г. к Меркурию (рис. 6) был отправлен космический аппарат европейской миссии Bepi-Colombo [28], который должен долететь до планеты к 2025 г. Кроме того, обсуждается запуск в 2030-х гг. российского космического зонда Меркурий-П, который должен совершить мягкую посадку на поверхность планеты. Обе эти миссии

будут исследовать запыленную экзосферу Меркурия. Подобно Луне, пылевая плазма над освещенной Солнцем поверхностью Меркурия состоит [29], в частности, из фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также заряженных пылевых частиц. Однако существуют следующие качественные различия между плазменно-пылевыми системами Меркурия и Луны, связанные с тем, что Меркурий имеет магнитосферу, а его орбита характеризуется высокими значениями эксцентриситета.

1. Воздействие магнитных полей может влиять на перенос пылевых частиц и, соответственно, расширение области существования пылевой плазмы над поверхностью Меркурия за счет влияния переноса пылевых частиц, но не столь значительно, как на Луне.

2. Из-за наличия у Меркурия магнитосферы солнечный ветер важен для образования пылевой плазмы на Меркурии только в окрестностях областей магнитных полюсов. В других районах Меркурия, в отличие от ситуации на Луне, солнечный ветер не оказывает существенного влияния на свойства пылевой плазмы. Параметры пылевой плазмы над Меркурием различны в ситуациях афелия и перигелия его орбиты.

Что касается спутников Марса, интерес к ним обусловлен, в частности, тем, что они могут оказаться более доступными для пилотируемых полетов, чем Марс. Ускорение свободного падения на них очень мало, и посадка космического аппарата на спутник Марса скорее напоминает сты-

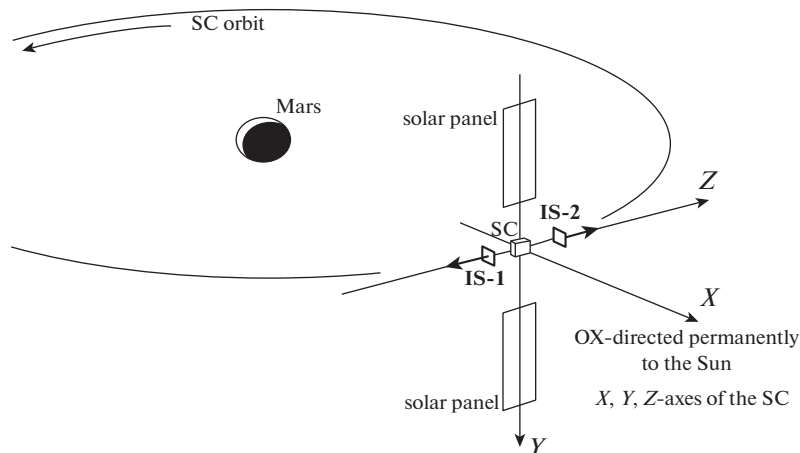


Рис. 7. Схема орбитального движения космического аппарата (SC) Phobos-Grunt 2 (Бумеранг). Отмечены пьезоэлектрические ударные сенсоры IS-1 и IS-2, которые, как предполагается, будут иметь возможность определять основные параметры пылевых частиц (импульс, масса, скорость, заряд). Рассматривается возможность установки ударных сенсоров на панелях солнечных батарей (solar panel).

ковку с другим аппаратом, чем приземление на планету. Согласно наблюдениям космического аппарата Викинг [30, 31], а затем космических аппаратов Фобос-2 и Марс-Экспресс [32], поверхность спутников Марса покрыта пылью. Слабая гравитация усиливает роль пыли на спутниках Марса, поскольку даже слабое возмущение может привести к формированию массивного пылевого облака над поверхностью спутника. В рамках миссии Phobos-Grunt 2 (Бумеранг) предполагается обнаружение пылевых частиц на орбите вокруг Марса и у поверхности Фобоса или Деймоса, а также определение основных параметров пылевых частиц (импульса, массы, скорости, заряда). Кроме того, ожидается измерение параметров плазмы и определение локального электрического поля у поверхности спутника Марса. Для этих целей будут использованы пьезоэлектрические ударные сенсоры (см. рис. 7), работа которых основана на ударном воздействии пылевой частицы, а также зонды для измерения параметров плазмы и локального электрического поля у поверхности Фобоса.

Теоретические исследования [17, 18] показали, что в отличие от Луны или Меркурия формирование плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса имеет нестационарный характер практически на всем протяжении светлого времени суток. Процессы вариации зарядов пылевых частиц, приводящие к затуханию их колебаний над поверхностью спутника Марса, оказываются слишком медленными по сравнению с протяженностью дня на этом спутнике. Для нахождения точных данных о параметрах плазменно-пылевой системы в окрестности спутников Марса необходимо иметь большую информацию о свойствах

грунта на них, например, такую, как работа выхода и квантовый выход вещества грунта и т.д., которые, как надеются авторы, будут получены в будущих космических миссиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен ряд результатов, касающихся пылевой плазмы у безатмосферных тел Солнечной системы. Интенсивные исследования плазменно-пылевых процессов проводятся также в отношении ионосфер Земли [33–35] и Марса [36–38], магнитосферы Сатурна [39, 40] и др. Как в случае безатмосферных космических тел, так и ионосфер и магнитосфер планет проявления нано- и микромасштабных компонент в космосе обусловлены модификацией в плазме при наличии заряженной пыли характера коллективных процессов [41–44], новой физикой нелинейных эффектов, процессами самоорганизации и т.д. Несмотря на достаточно долгую историю изучения пылевой плазмы в Солнечной системе, все еще существуют нерешенные проблемы, причем для успешного решения ряда из этих проблем требуются большие знания об исследуемых космических объектах, которые можно получить только в будущих космических миссиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель С.И. // Природа. 2015. № 9. С. 48.
2. Богатиков О.А. Неорганические наночастицы в природе // Вестн. РАН. 2003. Т. 73. С. 426.
3. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М.: Мир, 1979. 512 с.
4. Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapak, A.G., Morfill G.E. // Phys. Reports. 2005. V. 421. P. 1.

5. *Brownlee D.E.* // *Elements*. 2012. V. 8. P. 327.
6. *Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srnata R., Szalay J.R., Wright G.* // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 185. P. 93.
7. *Голубь А.П., Попель С.И.* // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. P. 393.
8. *Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н.* // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. P. 455.
9. *Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu.* // *Planet. Space Sci.* 2018. V. 156. P. 71.
10. *Mann I., Krivov A., Kimura H.* // *Icarus*. 2000. V. 146. P. 568.
11. *Jewitt D.* 2009. <http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/tail-HB.html>.
12. *Divine N., Fechtig H., Gombosi T.I., Hanner M.S., Keller H., Larson S., Mendis D., Newburn R., Reinhard R., Sekanina Z., Yeomans D.* // *Space Sci. Rev.* 1986. V. 43. P. 1.
13. *Interplanetary dust* / Eds. *E. Grün, B.A.S. Gustafson, S. Dermott, H. Fechtig*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer–Verlag, 2001.
14. *Popel S.I., Gisko A.A.* // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006. V. 13. P. 223.
15. *Popel S.I., Yu M.Y., Tsyrovich V.N.* // *Phys. Plasmas*. 1996. V. 3. P. 4313.
16. *Popel S.I., Gisko A.A., Golub' A.P., Losseva T.V., Bingham R., Shukla P.K.* // *Phys. Plasmas*. 2000. V. 7. P. 2410.
17. *Голубь А.П., Попель С.И.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2021. Т. 113. С. 440.
18. *Голубь А.П., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. С. 741.
19. *Rennilson J.J., Criswell D.R.* // *The Moon*. 1974. V. 10. P. 121.
20. *Zook H., McCoy J.* // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 2117.
21. *Зеленый Л.М., Попель С.И., Захаров А.В.* // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. С. 441.
22. *Попель С.И., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 12.
23. *Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. С. 641.
24. *Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B.* // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. P. 123701.
25. *Popel S.I., Golub' A.P., Kassem A.I., Zelenyi L.M.* // *Phys. Plasmas*. 2022. V. 29. P. 013701.
26. *Попель С.И., Голубь А.П., Кассем А.И., Зеленый Л.М.* // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. С. 451.
27. *Попель С.И., Голубь А.П.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2022. Т. 115. № 10. С. 629.
28. *Benkhoff J., Murakami G., Baumjohann W., Besse S., Bunce E., Casale M., Cremosese G., Glassmeier K.-H., Hayakawa H., Heyner D., Hiesinger H., Huovelin J., Hussmann H., Iafolla H., Iess L., Kasaba Y., Kobayashi M., Milillo A., Mitrofanov I.G., Montagnon E., Novara M., Orsini S., Quemerais E., Reininghaus U., Saito Y., Santoli F., Stramaccioni D., Sutherland O., Thomas N., Yoshikawa I., Zender J.* // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. P. 90.
29. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M.* // *Phys. Plasmas*. 2023. V. 30. P. 043701.
30. *Thomas P.* // *Icarus*. 1979. V. 40. P. 223.
31. *Thomas P., Veverka J.* // *Icarus*. 1980. V. 42. P. 234.
32. *Zakharov A., Horányi M., Lee P., Witasse O., Cipriani F.* // *Planet. Space Sci.* 2014. V. 102. P. 171.
33. *Klumov B.A., Popel S.I., Bingham R.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2000. Т. 72. С. 524.
34. *Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И.* // *ЖЭТФ*. 2005. Т. 127. С. 171.
35. *Дубинский А.Ю., Попель С.И.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2012. Т. 96. С. 22.
36. *Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2019. Т. 45. С. 913.
37. *Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 57.
38. *Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2023. Т. 117. С. 420.
39. *Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. С. 163.
40. *Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 582.
41. *Popel S.I., Morfill G.E., Shukla P.K., Thomas H.* // *J. Plasma Phys.* 2013. V. 79. P. 1071.
42. *Попель С.И., Морозова Т.И.* // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. С. 474.
43. *Popel S.I., Kassem A.I., Izvekova Yu.N., Zelenyi L.M.* // *Phys. Lett. A*. 2020. V. 384. P. 126627.
44. *Извекова Ю.Н., Резниченко Ю.С., Попель С.И.* // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. С. 1119.