

УДК 523

ЛУННАЯ ПЫЛЬ: СВОЙСТВА, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ

© 2020 г. А. В. Захаров^а, *, Л. М. Зеленый^а, С. И. Попель^а^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 29.05.2020 г.

После доработки 20.06.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

Поверхность Луны, как и поверхность любого безатмосферного тела Солнечной системы, подвержено постоянной бомбардировке микрометеоритов, а также воздействию солнечного излучения, солнечного ветра и других факторов космического пространства. В результате ударных воздействий высокоскоростных микрометеоритов в течение миллиардов лет силикатная основа поверхности Луны измельчается, превращаясь в частицы с широким распределением по размерам. Учитывая взрывную природу возникновения, эти частицы, характеризуется крайне нерегулярной формой с заостренными краями, либо спекшимися при больших температурах конгломератами, либо близкими к сферам каплям. На освещенной стороне Луны солнечное излучение, особенно ультрафиолетовая часть его спектра, и потоки солнечного ветра при взаимодействии с верхним слоем реголита приводят к формированию поверхностного заряда реголита. Фотоэлектроны, возникшие над поверхностью, и заряженная поверхность реголита создают приповерхностный двойной слой. Электрическое поле, возникающее в этом слое, и флуктуации заряда частиц на поверхности приводят к тому, что электрические силы могут превышать силы гравитации и силы адгезии Ван дер Вальса. В результате этого частицы реголита микронного и субмикронного размеров способны отрываться от поверхности и левитировать над поверхностью. Такие динамические процессы приводят к переносу пылевых частиц над поверхностью Луны, а также к рассеянию солнечного света на этих частицах. Свечения над поверхностью Луны такой природы наблюдали телевизионные системы американских и советских посадочных аппаратов на ранних этапах исследований Луны. Американские астронавты, высадившиеся на поверхность Луны при реализации программы “Аполлон” также обнаружили проявления лунной пыли. Оказалось, что пылевые частицы, левитирующие над поверхностью реголита в результате естественных процессов и поднятые с поверхности в результате антропогенных факторов, вызывают множество технологических проблем, влияющих на работоспособность посадочных аппаратов и их систем, на деятельность астронавтов на поверхности Луны и их здоровье. По результатам этих экспедиций был сделан вывод, что пылевые частицы микронного и субмикронного размера, левитирующие над поверхностью, являются основным труднопреодолимым фактором при дальнейших исследованиях и освоении Луны. С тех пор изучению физических процессов, связанных с динамикой лунной пыли, проявлениям ее агрессивных свойств (“токсичности”), способами уменьшения влияния пыли на инженерные системы и человека, стали актуальными направлениями теоретических и экспериментальных исследований. В статье на основе результатов выполненных за последние полвека исследований, связанных с динамикой пылевых частиц, обсуждаются вопросы формирования лунного реголита, приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы Луны под действием внешних факторов космического пространства. Рассматриваются причины и условия динамики пылевых частиц, следствия этих процессов, влияние антропогенных факторов на динамику пылевых частиц, а также угрозы для космических аппаратов и инженерных систем при реализации планируемых программ исследований и освоения Луны. Приведены основные нерешенные проблемы, связанные с динамикой пылевой составляющей лунного реголита, обсуждаются методы решения проблемных вопросов.

Ключевые слова: пылевые частицы, реголит, пылевая плазма, экзосфера Луны, токсичность лунной пыли**DOI:** 10.31857/S0320930X20060079

ВВЕДЕНИЕ

Луна была первым внеземным телом, к которому было привлечено внимание пионеров космических исследований. Прошло примерно полвека с тех пор, когда была выполнена активная

компания по исследованию Луны. В то время серия российских и американских автоматических посадочных аппаратов и американская пилотируемая программа “Apollo” провели беспрецедентную по своей насыщенности и объему программу

изучения Луны. Были получены уникальные прорывные данные о реголите Луны, плазменном окружении, выполнено большое число экспериментов с помощью автоматических и пилотируемых экспедиций, доставлено более 300 кг образцов лунного реголита на Землю для лабораторных исследований. Накоплен богатый опыт выполнения активных экспериментов с помощью Луноходов, непосредственной деятельности человека на поверхности Луны. При этом первым неожиданным результатом этих исследований стало обнаружение зарева над поверхностью, зарегистрированного телевизионными камерами, установленными на нескольких автоматических посадочных аппаратах. Интерпретация этого явления привела к выводу, что солнечный свет рассеивается на пылевых частицах, левитирующих над поверхностью Луны (Rennilson, Criswell, 1974). При подготовке пилотируемой программы исследований Луны "Apollo" это факт был уже известен, и он был учтен при разработке программы деятельности астронавтов на поверхности Луны, проведении научных исследований, наземных испытаниях. Однако, несмотря на подготовку к возможным проблемам, связанным с лунной пылью, по мнению американских астронавтов, работавших на поверхности Луны, фактор лунной пыли оказался самым неожиданным и неприятным по степени воздействия на посадочный аппарат, его системы, на деятельность астронавтов на поверхности и на их здоровье. По результатам выполнения программы "Apollo" был сделан вывод, что антропогенное воздействие вызывает более активную динамику лунной пыли, чем естественные процессы, связанные с частицами над поверхностью, обнаруженные автоматическими аппаратами (Gaier, 2005).

В течение последних десятилетий проводились модельные теоретические и экспериментальные исследования, направленные на понимание природы этого явления, поиск путей снижения негативного воздействия микрочастиц на системы посадочных аппаратов и человека. За это время многое удалось понять, однако остаются множество нерешенных проблем. В последнее время, когда космические агентства ведущих космических держав обращают свое внимание на интенсивные исследования и последующее освоение Луны, интерес к процессам, связанным с динамикой лунной пыли, ее влиянию на посадочные аппараты, их инженерные системы, на деятельность космонавтов и их здоровье, значительно возрастает.

Процессы, приводящие к формированию микрочастиц на Луне, ее отрыву от поверхности и дальнейшей динамике над поверхностью, включают множество внешних факторов воздействия на Луну и физических процессов на поверхности и приповерхностной экзосфере. В настоящем обзоре сделана попытка рассмотреть эти внешние

факторы, и каким образом они приводят к физическим процессам на поверхности реголита и приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере. Рассмотрены условия, при которых микрочастицы, лежащие на поверхности реголита, способны оторваться от поверхности и левитировать над ней. Приведены примеры опыта выполнения программы "Apollo", как пылевые частицы могут воздействовать на посадочный аппарат, его инженерные системы, на деятельность астронавта на поверхности Луны.

В разделе "Внешние источники воздействия на Луну" рассмотрены внешние факторы, воздействующие на Луну, каким образом они формируют реголит, влияют на его свойства. Раздел "Реголит и лунная пыль" посвящен рассмотрению основных свойств реголита, его структуры. Основное внимание здесь уделяется той части реголита, которая определяется как лунная пыль. В разделе "Динамика лунной пыли" представлены основные результаты наблюдений на поверхности Луны, демонстрирующие естественные динамические проявления лунной пыли. Обсуждаются модельные представления физических процессов, приводящие к отрыву пылевых частиц от поверхности реголита и дальнейшей их динамики в приповерхностной экзосфере Луны. Раздел "Токсичность лунной пыли" посвящен описанию агрессивных воздействий частиц лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов, условия деятельности астронавтов на поверхности Луны и на самих астронавтов, т.е. те свойства лунной пыли, которые делают ее "токсичной". В обзоре не обсуждаются биомедицинские проблемы, возникшие при выполнении программы "Apollo", которые очень важны, но представляют собой отдельную проблему, связанную со здоровьем человека. В Заключении обобщаются основные выводы и направления будущих исследований, направленные на понимание физических процессов, связанных с лунной пылью.

ВНЕШНИЕ ИСТОЧНИКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛУНУ

Луна, как и все тела, лишённые атмосферы и дипольного магнитного поля, постоянно бомбардируются микрометеоритами, солнечным излучением и космическими лучами. Эти процессы, известны под общим названием *космического выветривания (space weathering)* (Pieters и др., 1993). Все внешние факторы по своему физическому воздействию на поверхность Луны могут быть сгруппированы на две широкие категории: (1) случайные удары микрометеоритов о поверхность тела и (2) воздействие на поверхность электромагнитного излучения Солнца и окружающей плазмы (солнечного ветра, плазмы магнитосферы).

ры при прохождении Луны через отдаленный хвост магнитосферы Земли и энергичных частиц солнечного или галактического происхождения) (Pieters, 2016). Именно космическое выветривание приводят к формированию реголита этих тел, его химической эволюции, приводит к распылению поверхностного материала, контролирует электрические свойства поверхности и приповерхностной экзосферы, влияет на состав экзосферы Луны, и в значительной степени приводит к изменению рельефа поверхностей (Kallio и др., 2019; O'Brien и др., 2019).

Энергия, выделяемая при ударах микрометеоритов, приводит к разрушению реголита на более мелкие частицы (измельчение) и испарению. Эта энергия также может приводить к плавлению и испарению части материала самого ударника. В зависимости от параметров удара (скорость ударника, состав поверхности, геометрия удара и т.д.), часть материала микрометеорита может быть сохранена и смешана с материалом реголита, либо в результате ударного процесса может образоваться новое вещество. Такие многократно повторяющиеся ударные воздействия микрометеоритов различных размеров перемешивают и перерабатывают предварительно сформированные частицы реголита на разные глубины в процессе геологических эпох. Поэтому фактическое время, проведенное на поверхности отдельной частицей реголита, и собственно существование конкретной частицы реголита, определяется как стохастический процесс (Pieters, 2016). Кристаллическая структура частиц верхнего слоя реголита под воздействием интенсивного солнечного УФ-излучения, энергичных частиц солнечного и галактического происхождения может быть изменена или деформирована. Воздействие на частицы верхнего слоя реголита происходят также из-за глубоких тепловых вариаций при суточном вращении Луны (Molano и др., 2015). Этот фактор приводит к структурной усталости материалов реголита, а также к потере летучих веществ в результате лучистого нагрева и сублимации (Pieters, 2016).

Луна при своем орбитальном движении периодически оказывается либо в межпланетной плазме (солнечный ветер), либо пересекает геомагнитный хвост, который в свою очередь структурирован на зоны с различными характеристиками плазмы. На рис. 1 представлена схема орбитального движения Луны, при котором Луна пересекает ударную волну и геомагнитный хвост. Время пересечения Луной хвоста (~9 дней), обычно составляет ~30% орбитального периода, но может меняться в зависимости от состояния солнечного ветра.

Микрометеориты. Поток микрометеоритов кометного и астероидного происхождения, подающих Луну, так же, как и на Землю, изотропный

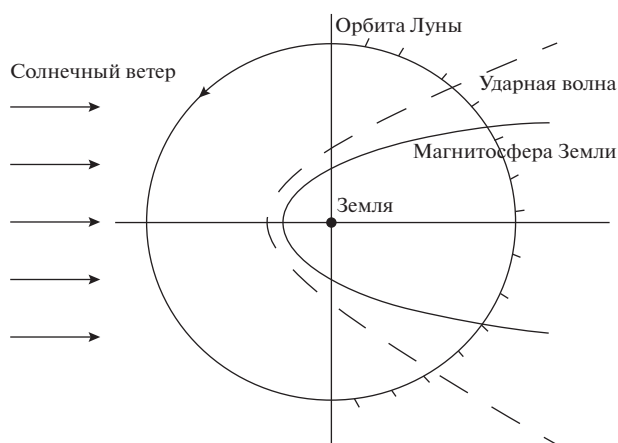


Рис. 1. Схематическое изображение орбиты Луны, ударной волны и границы магнитосферы Земли в плоскости, близкой к эклиптике. Отметки на части орбиты Луны указывают интервалы, которые Луна проходит за время, равное земным суткам.

(Grun и др., 1985; 2011). Его величина оценивается около 10^6 кг в год (Флоренский и др., 1975; Zook, 1975; Grün и др., 2011). Плотность метеороидных частиц обычно близка к значению 2.5 g/cm^3 . Большинство этих частиц имеют размеры от 10 нм до 1 мм, а скорость соударения в диапазоне 10–72 км/с (Grun и др., 1985; 2011). 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” (Brownlee и др., 1972; Katzan, Edwards, 1991). Значительная доля вещества, выбрасываемого с поверхности Луны в результате высокоскоростного удара о поверхность Луны, возвращается обратно на лунную поверхность, формируя слой реголита. 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 (Grün и др., 2011; Liu, Taylor, 2011). При скорости выброса $v_2 = 2.4 \text{ км/с}$ вторичные частицы навсегда покидают Луну. Осаждение пылевых частиц на лунную поверхность при бомбардировке ее микрометеоритами и образовавшимися вторичными частицами оценивается $800 \text{ частиц см}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (для частиц $>1 \text{ мкм}$) (Brownlee и др., 1972).

Ионизирующие излучения. Солнечный ветер, истекающий из солнечной короны, представляет собой поток электронов, протонов, а также ядер гелия и незначительное количество других ядер, которые, тем не менее, составляют основной ис-

точник редких элементов лунного реголита. Средняя скорость частиц спокойного солнечного ветра составляет ~ 400 км/с, но может значительно меняться в зависимости от активности Солнца. Плотность плазмы солнечного ветра вблизи Земли (и Луны) ~ 10 см $^{-3}$. До недавнего времени полагали, что при взаимодействии с лунным реголитом частицы солнечного ветра пассивно им поглощаются (Feldman и др., 2000; Crider, Vondrak, 2002). При этом глубина поглощения ионов ничтожная и составляет меньше микрона. Однако результаты исследований взаимодействия солнечного ветра с Луной, выполненные космическими аппаратами Chandrayaan-1, Kaguya, Chang'E-1, ARTEMIS и IBEX, показали, что при взаимодействии плазмы солнечного ветра с лунным реголитом происходят несколько различных процессов (Bhardwaj и др., 2015). При попадании на поверхность Луны, основная масса ионов поглощается реголитом. Значительная часть ионов ~ 10 –20%, падающих на поверхность Луны, захватывают электроны и рассеиваются в виде нейтральных атомов (McComas и др., 2009; Wieser и др., 2009; Lue и др., 2018). Однако небольшая их часть (~ 0.1 –1.0%) рассеивается от поверхности, сохраняя положительный заряд H^+ (Saito и др., 2008). Кроме поглощения и рассеяния, ионы солнечного ветра приводят к распылению частиц реголита (Wurz и др., 2007).

Поток солнечного ионов ветра в среднем соответствует 4.5×10^{12} ions m $^{-2}$ s $^{-1}$ и крайне изменчив во времени (Wurz и др., 2007). Учитывая, что $\sim 95\%$ ионов составляют протоны, это поток соответствует 8.5×10^{-15} kg m $^{-2}$ s $^{-1}$. Таким образом, общая величина солнечного вещества, имплантируемого в лунный реголит, составляет 4.3×10^{25} ions s $^{-1}$, или 0.081 kg s $^{-1}$, что приблизительно в 4 раза больше потока микрометеоритов на Луну. Следует заметить, что рассеяние реголитом тяжелых элементов солнечного ветра (углерод, железо и выше), происходит более эффективно, чем водорода и гелия, поэтому верхний слой реголита обогащен именно этими элементами (Wurz и др., 2007).

Как известно, Луна не имеет дипольного магнитного поля. Однако на Луне имеются локальные области, с намагниченными породами поверхности, так называемые “магнитные аномалии” (Coleman и др., 1972; Hood и др., 2001; Halekas и др., 2001; Richmond и др., 2003; Tsunakawa и др., 2015). Потоки плазмы солнечного ветра, встречая такие области на поверхности Луны, могут формировать “мини-магнитосферы” (Lin и др., 1998). В таких областях взаимодействие плазмы солнечного ветра с поверхностью Луны в значительной степени контролируется локальным магнитным полем.

Помимо потоков плазмы солнечного ветра поверхность Луны подвергается воздействию высокоэнергичных космических лучей солнечного и

галактического происхождения. Солнечные космические лучи (СКЛ) это поток заряженных частиц, ускоренный во время солнечных вспышек во внешней части атмосферы Солнца. Частота возникновения солнечных вспышек очень вариabельна и соответствует 11-летнему циклу солнечной активности. Энергия ядер СКЛ может достигать 10^8 и даже 10^{10} эВ. Галактические космические лучи (ГКЛ), как и СКЛ состоят, в основном из ядер водорода и гелия. Кроме того, ГКЛ включают заметный состав тяжелых ядер ($Z > 20$). Энергия ГКЛ распределена в очень широком диапазоне – от 10^9 до 10^{20} эВ. Потоки СКЛ и ГКЛ значительно меньше потоков плазмы солнечного ветра и составляют до $\sim 10^6$ ядер/см ^{2} с для СКЛ и 2–4 ядер/см ^{2} с для ГКЛ. В зависимости от энергии СКЛ могут проникать в реголит на глубину от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, в то время как ГКЛ – на глубину от нескольких сантиметров до нескольких метров (Halekas и др., 2007; 2009).

Магнитосферная плазма. При орбитальном движении вокруг Земли Луна пересекает магнитосферный хвост Земли и таким образом приблизительно 30% лунных суток (~ 9 земных дней) Луна оказывается под воздействием магнитосферной плазмы. Структура земной магнитосферы достаточно сложна, она крайне динамична и во много зависит от параметров солнечного ветра и активности Солнца. Не рассматривая детально структуру зон обтекания Земли солнечным ветром, следует заметить, что перед пересечением ударной волны, в области называемой форешок (foreshock region, например, Asbridge и др., 1968; Eastwood и др., 2005) и после его пересечения, в зоне магнитного слоя (terrestrial magnetosheath) (Frank, 1985, и ссылки к этой статье), плазма во многом определяется параметрами солнечного ветра. При пересечении границы магнитосферы – магнитопаузы, Луна попадает в плазму хвоста магнитосферы и может оказаться либо в одной из долей хвоста (tail lobes), либо в низкоширотном пограничном слое или плазменном слое (plasma sheet) (Tsurutani и др., 1984a; 1984b). В северном и южном долях хвоста плотность плазмы очень мала 10^{-3} – 10^{-2} см $^{-3}$ (Peterson и др., 1984). В плазменном слое магнитосферного хвоста, который делит северный и южный доли, плотность плазмы составляет 0.05–0.2 см $^{-3}$, но характеризуется высокой температурой ионов (1–5 кэВ) и сильно изменчивой скоростью (10–1000 км/с) (Frank, 1985). Плазменные инструменты миссии “Apollo-12 и -15” позволили получить важную информацию о влиянии магнитосферной плазмы на поверхность Луны (Rich и др., 1973; Clay и др., 1975). Модельные исследования влияния магнитосферной плазмы на электрический заряд лунной поверхности и динамику пылевых частиц, левити-

рующих над поверхностью, выполнены в недавней работе (Vaverka и др., 2016).

Солнечное электромагнитное излучение. Исследования солнечного ультрафиолетового излучения и связанного с ним космического выветривания на Луне проводились достаточно подробно еще со времен миссии “Apollo-17” (данные Ultraviolet Spectrometer, UVS Lucke и др., 1976). Обзор таких исследований дан в работе (Hendrix и др., 2012). Интенсивное солнечное УФ-излучение (так же как и энергичные СКЛ и ГКЛ) может повредить первоначальную кристаллическую структуру верхней поверхности зерен реголита (Pieters, Noble, 2016). Спектр отраженного от поверхности Луны солнечного УФ-излучения может дать полезную информацию о химическом составе лунного реголита (Hendrix и др., 2012). Здесь также следует упомянуть о роли солнечного УФ излучения в фотоэмиссии верхнего слоя реголита в формировании плазменно-пылевой экзосферы на освещенной поверхности Луны. Но этот эффект будет подробно обсуждаться в следующем разделе обзора.

РЕГОЛИТ И ЛУННАЯ ПЫЛЬ

Основная информация о лунном реголите получена в результате исследований его образцов, доставленных на Землю в результате выполнения программы “Apollo” а также экспедициями “Луна-16, -20 и -24”. В работе (Graff, 1993) содержится систематизированный каталог образцов лунного грунта, доставленных при выполнении всех экспедиций программы “Apollo”. Образцы лунного реголита, доставленные из различных областей лунных морей и возвышенностях, анализировались по обширным программам литологических, минералогических, элементных, гранулометрических, физических и др. исследований (например, McKay, Ming, 1990; Liu, Taylor, 2011; Иванов, Назаров, 2012).

Учитывая, что реголит является результатом ударного метаморфизма, большая его часть представляет собой мелкие и неконсолидированные обломки подстилающих кристаллических горных пород, покрывающих всю лунную поверхность. Более четверти (по массе) лунных частиц реголита представляют собой связанные стеклом агрегаты из более мелких частиц почвы (glass-bounded aggregates) (McKay и др., 1991) и брекчии. Брекчия — это крупнозернистая порода, полученная в результате ударной фрагментации, состоящая из фрагментов породы, скрепленных мелкозернистой матрицей (McKey, Morrison, 1971). Толщина этого слоя составляет обычно 4–5 м в области лунных морей и 10–15 м в гористых районах (McKay и др., 1991; Фа и др., 2019).

Образцы лунного реголита, доставленные по программе “Apollo”, получены, в основном, (80–

90%) с поверхности и до глубины от 30 до 60 см и, с точки зрения распределения частиц по размерам, во многом идентичны (Carrier, 1973). Частицы с размером < 1 мм составляют более 95% массы реголита. Наиболее мелкая компонента реголита, менее 100 мкм, определяют как лунная пыль. Именно эта составляющая лунного реголита представляет наибольший интерес для данного обзора. Средний размер частиц находится в диапазоне от 40 до 100 мкм. Такие частицы составляют порядка половины веса лунного реголита, при этом большая его часть имеет размеры от 45 до 80 мкм (Carrier, 1973; McKay и др., 1991). Для несферических частиц под “размером” частицы обычно понимают диаметр эквивалентной сферы или окружности (Liu, Taylor, 2011).

Гранулометрический состав частиц исследовался различными методами, которые включали калиброванное сито, лазерный анализ, метод аэрозольной диагностики, анализ изображений, полученных сканирующим электронным микроскопом (SEM) и др. На рис. 2 представлены несколько примеров распределения размеров зерен, полученные разными методами. Данные о распределении микрочастиц по размерам имеют важное значение для исследований условий отрыва частиц от поверхности и их дальнейшей динамики, для проектирования эффективных мер систем фильтрации для среды обитания человека, а также для исследований токсикологических эффектов влияния пыли на функции дыхания человека (Park и др., 2006).

Верхний слой реголита (несколько мм) представляет собой чрезвычайно пористую ($> 80\%$) структуру (Napke, Sato, 2016). С глубиной плотность реголита увеличивается, и инфракрасные измерения показывают, что характеристики верхних ~ 10 см реголита приблизительно одинаковые по всей поверхности Луны, за исключением недавно сформированных ударных кратеров (Hayne и др., 2017). Объемная плотность реголита по данным “Луна-20” составляет около от 1.04 до 1.80 г см $^{-3}$ для различных образцов (Leontovich и др., 1974; Слюта, 2014). Образцы, полученных по программе “Apollo”, указывают на различную плотность реголита, вплоть до 1.9 г см $^{-3}$ (Papike и др., 1982; Carrier и др., 1991).

Форма пылевых частиц, как правило, крайне нерегулярная с ярко выраженными заостренными краями, что очень отличает их от земных аналогов. Плотность отдельных частиц обычно принимают $2.7\text{--}3.0$ г см $^{-3}$ (Carrier и др., 1991). В работе (Liu и др., 2008) представлена богатая коллекция изображений частиц лунного реголита. На рис. 3 из этой коллекции изображений для примера представлен типичный образец агглютината — пористое стекло с вплавленными частицами породы и железа. В работе (Park и др., 2006a) все пылевые частицы могут быть морфологически клас-

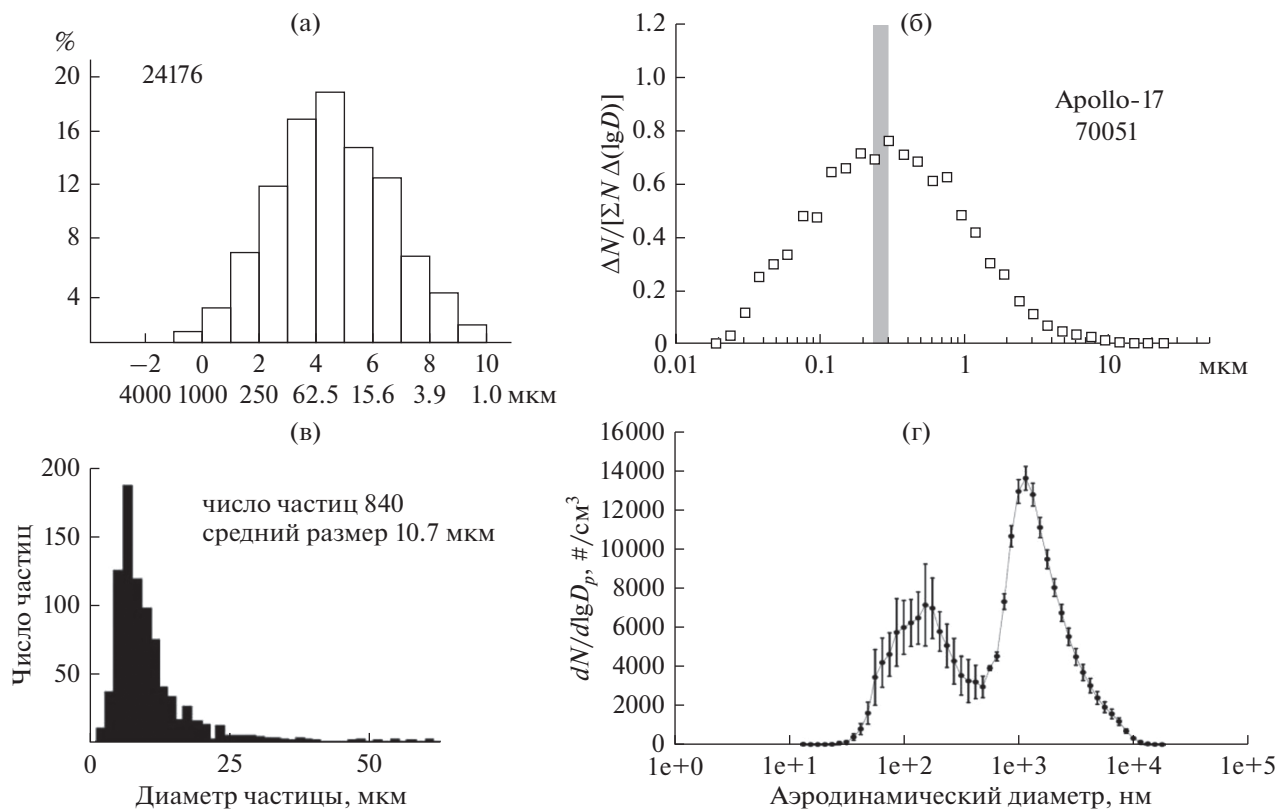


Рис. 2. Примеры распределения пылевых частиц по размерам, полученные различными методами, для разных образцов, доставленных на Землю.

(а) Гистограмма распределения по размерам частиц реголита для образца 24176, доставленного “Луна-24”. По оси ординат — % массы исследуемых частиц, по оси абсцисс размер гранул в мкм и $\phi = -\log_2 d$ мм (Родэ, Иванов, 1984).

(б) Распределение по размерам частиц <43 мкм для образца 70051, доставленного “Apollo-17”. По оси ординат — число частиц в заданном интервале размеров ΔN , нормированное на общее число исследуемых частиц $\Sigma N \Delta(\log D)$ для учета различного числа частиц в выбранных интервалах. По оси абсцисс — размер частиц (Liu, Taylor, 2011).

(в) Распределение по размерам частиц, полученных с внешней поверхности скафандров “Apollo-17” с помощью клейкой ленты. Из 840 собранных частиц, размер наибольшего числа частиц составлял ~10.7 мкм. (Christoffersen и др., 2009).

(г) Распределение по размерам частиц образца реголита 10084, доставленного экспедицией “Apollo”. Измерения проводились аэрозольным методом, который позволял исследовать субмикронные и микронные частицы в двух диапазонах: от 2.5 до 500 нм и от 500 нм до 20 мкм. По оси ординат — число частиц в куб. см, содержащееся в интервале размеров с шириной $\log D_p$, по оси абсцисс — натуральный логарифм диаметра частицы D_p (Greenberg и др., 2007).

сифицированы на четыре типа: (1) сферические, (2) блоки неправильной формы с острыми углами, (3) осколки (чешуйки) стекла и (4) нерегулярные (пористые, “швейцарский сыр”), причем подчеркивается, что частицы нерегулярной формы, как правило, имеют заостренные углы. Форма частиц, в основном, продолговатая, что приводит к преимущественному слипанию отдельных частиц вдоль их продольных осей. Следствием такой особенности тонкой фракции реголита является анизотропия физических свойств (Mahmood и др., 1974).

Лунная порода обычно состоит из пироксена, плагиоклаза, ильменита, оливина, с небольшим содержанием множества других минералов (Agrell и др., 1970). Причем, химический анализ лунной пыли показывает, что, с уменьшением размера частиц, уменьшается доля четко определенных

минералов, но увеличивается доля стеклообразного материала. Общий химический состав лунной пыли изменяется по всей лунной поверхности, но составляет около 50% SiO_2 , 15% Al_2O_3 , 10% CaO , 10% MgO , 5% TiO_2 и 5–15% железа [Loftus и др., 2010]. Ключевой особенностью лунного реголита и лунной пыли является присутствие большего, чем ожидалось, количества нанофазного металлического железа (npF). Именно эта особенность легко различает лунные породы и их наземные аналоги. Появление нанофазного металлического железа является следствием постоянного воздействия солнечного ветра и высокоэнергетичных частиц солнечного и космического происхождения (Keller, McKay, 1993). Эти частицы, подавляющее большинство которых составляет водород, имплантируются в реголит. Протоны солнечного ветра поглощаются в частицах лунного реголита

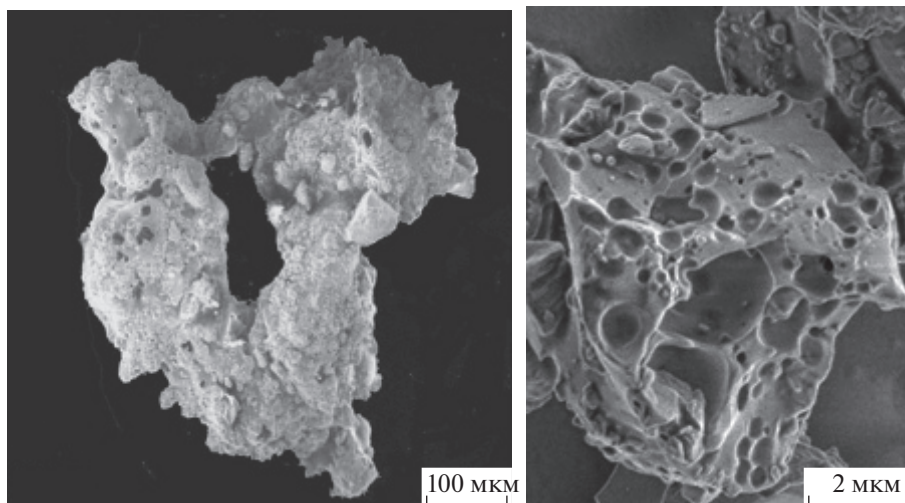


Рис. 3. Фотографии двух частиц лунного реголита. Слева пористое стекло с вкраплениями частиц реголита и железа. Справа частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонент при формировании в результате плавления (Liu и др., 2008).

на глубинах до 100 мкм. При этом могут образовываться нейтральные атомы и молекулы водорода или химические соединения, содержащие водород, в частности, относящиеся к гидроксильным группам (Starukhina, 2001). Этот имплантированный водород в результате диффузии выходит на поверхность Луны и может достигать достаточно больших поверхностных концентраций водородосодержащих веществ, вплоть до величин порядка 10^{17} см^{-2} (Starukhina, 2001). При переработке реголита, обогащенного водородом, микрометеоритами, происходит плавление вещества и реакции, в частности, H с FeO . При этом образуются пары воды и субмикронные частицы металлического железа, спекающихся в стекло (McKay и др., 1991). Частицы нанофазного железа в агглютинатах имеют широкий диапазон размеров от нескольких нанометров до нескольких сотен нанометров. Все эти процессы происходят до тех пор, пока переработанный реголит не покроется слоем выбросов породы из рядом образовавшегося кратера, и процесс переработки реголита в тонкую фракцию продолжается. Следует заметить, что эффективность фотоэмиссии поверхности Луны, обогащенной водородом, оказывается значительно более высокой, чем окружающих участков (Колесников, Мануйлов, 1982), что влияет на процессе зарядки пылевых частиц и их динамику. Эти вопросы будут рассмотрены в следующем разделе.

Электрические свойства пылевых частиц и основной части силикатов лунного реголита характеризуются чрезвычайно низкой электрической проводимостью порядка 10^{-14} mho/m (для реголита) и 10^{-9} mho/m (для лунной породы) при нулевой освещенности (Vanoman и др., 1991; Carrier и др.,

1991). С повышением температуры электропроводность реголита и породы возрастает и при солнечном УФ электрическая проводимость увеличивается приблизительно в 10^6 раз.

Относительная диэлектрическая проницаемость определяется плотностью реголита ρ и составляет приблизительно 1.9^{ρ} , где ρ в г/см^3 (Carrier и др., 1991), и зависит от минералогического состава реголита. Чрезвычайно низкая электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость реголита указывает на то, что лунный реголит слабо поглощает электромагнитную энергию и характеризуется достаточно эффективной фотоэмиссией.

Эти характеристики лунного реголита косвенно указывают на отсутствие воды в материале исследуемых образцов. Однако в ранней работе (Ахматова, 1978) отмечалось, что методом ИК-спектроскопии в колонке реголита “Луна-24” были обнаружены следы воды, около 0.1%. В то время существовало устойчивое представление о Луне, как абсолютно безводном теле, крайне обедненном летучими компонентами (Иванов, Назаров, 2012), и на этот результат не было обращено внимания. Сейчас известно, что в некоторых полярных областях Луны регистрируется водород с концентрацией, соответствующей расчетному содержанию водяного льда от 0.5 до 4.0% по массе в зависимости от глубины. Эти данные были получены по результатам измерений потоков нейтронов от поверхности Луны прибором LEND на борту LRO (Mitrofanov и др., 2010).

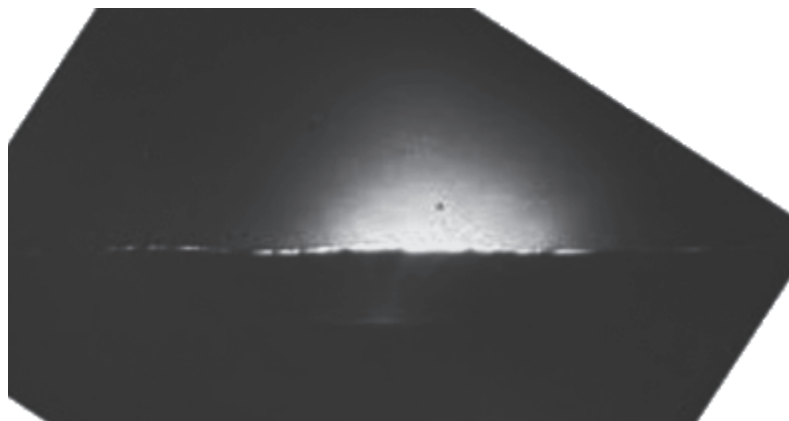


Рис. 4. Необработанное изображение LHG, полученное “Surveyor- 6” (фрагмент фотографии из National Space Science Center Data Center) (Colwell и др., 2007).

ДИНАМИКА ЛУННОЙ ПЫЛИ

Солнечное излучение и потоки плазмы, воздействуя на реголит, создают токи через поверхность, включая фототок, ионный и электронный токи плазмы, ток вторичных электронов. Эти токи зависят от потенциала поверхности и в равновесном состоянии при сформировавшемся потенциале поверхности их сумма близка к нулю (Manka, 1973; Whipple, 1981). Время установления потенциала $\ll 1$ с (Halekas и др., 2011). Учитывая, что поверхность реголита близка к диэлектрику (Olhoeft и др., 1974; Schwerer и др., 1974), приобретенный потенциал поверхности может сохраняться длительное время (De and Criswell, 1977; Criswell, De, 1977). При этом между заряженной поверхностью Луны и окружающей квазинейтральной плазмой возникает двойной (плазменный) слой с электрическим полем E . Характерная высота этого слоя порядка длины Дебая. На пылевые частицы, лежащие на поверхности Луны и получившие электрический заряд q , действуют кулоновская сила qE , гравитационная сила mg_L (m — масса частицы, g_L — ускорение свободного падения на Луне) и силы адгезии Ван дер Вальса F_c . Если кулоновская сила отталкивания превышает сумму сил, удерживающих ее на поверхности $qE > mg_L + F_c$, частица отрывается от поверхности и левитирует в приповерхностном электрическом поле. Условием левитации частицы является приблизительное равенство электрической и гравитационной сил $qE \approx mg_L$. Концепция пылевых частиц, левитирующих над поверхностью реголита была предложена в работах (Singer, Walker, 1962; Criswell, 1973). В зависимости от того, в каких условиях находится поверхность Луны, знак и величина потенциала поверхности, а также значения электрического поля могут существенно меняться. Это общая картина формирования потенциала поверхности реголита, приповерхностного

электрического поля и условий динамики пылевых частиц.

Наблюдения пыли над поверхностью. Первые указания на присутствие пылевых частиц над поверхностью Луны были обнаружены с помощью посадочных аппаратов “Surveyor-5, -6 и -7” на ранних этапах исследований Луны (Rennilson, Criswell, 1974). Сразу после захода Солнца телевизионные камеры этих аппаратов зарегистрировали свечение над терминатором. Этот эффект, названный LHG (Lunar Horizon Glow) авторы интерпретировали как рассеяние света на микрочастицах, левитирующих над поверхностью на высоте < 1 м под действием электростатических сил. В той же работе, предполагая, что эти частицы сферические, авторы оценили их радиус $\sim 5\text{--}6$ мкм и концентрацию в колонке ~ 50 част. см^{-2} . На рис. 4 представлено одно из нескольких изображений LHG, полученное “Surveyor- 6” (фрагмент Fig. 4 из статьи Colwell и др., 2007).

Регистрация динамики пылевых частиц над поверхностью Луны была впервые выполнена с помощью эксперимента Lunar Ejecta and Meteorite (LEAM), развернутого на поверхности Луны астронавтами экспедиции “Apollo-17” (Berg и др., 1976). Прибор LEAM был создан для регистрации высокоскоростных ($1 < v < 25$ км/с $^{-1}$) микрометеоритов. Однако один из детекторов имел возможность регистрировать низкоскоростные частицы. Именно данные этого детектора дали неожиданные результаты о достаточно высоких потоках низкоскоростных ($v \sim 100\text{--}1000$ м с $^{-1}$) частиц, заряд которых обычно составлял $Q > 10^{-12}$ С. За время работы прибора максимальная скорость счета детекторов наблюдалась в районе терминатора, причем наиболее значительное увеличение потоков таких низкоскоростных частиц происходило в районе восхода Солнца. В дневное время данных измерений не было, потому что прибор

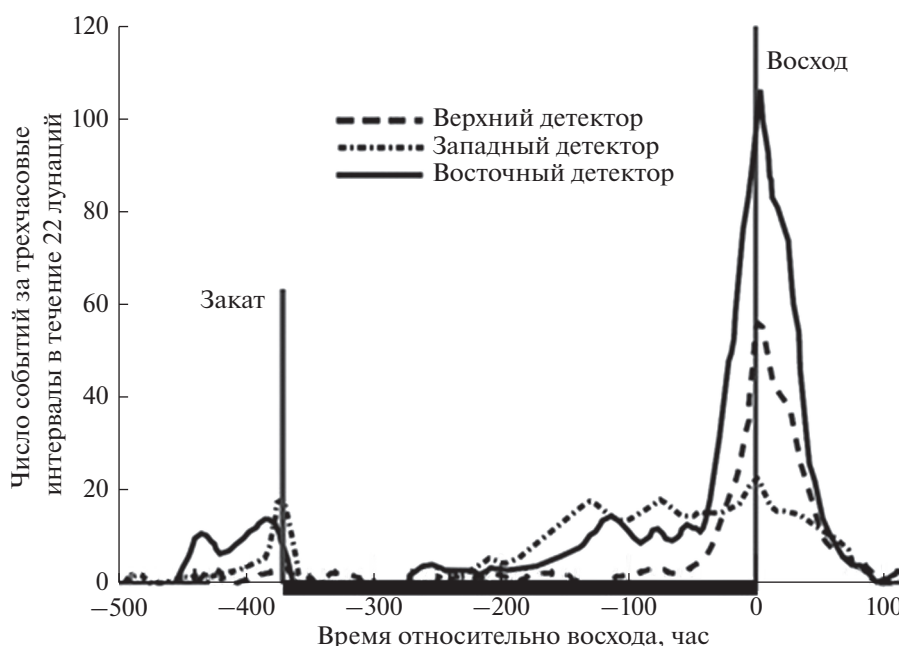


Рис. 5. Число регистраций пылевых частиц в трехчасовом интервале измерений над поверхностью Луны прибором LEAM. Данные проинтегрированы за 22 лунных суток (Berg и др., 1976). Толстой линией по горизонтальной оси отмечено ночное время.

выключался из-за повышения температуры выше допустимого уровня. На рис. 5 представлено число регистраций пылинок в трехчасовом интервале (скорость счета), просуммированных за 22 лунных суток. На этом графике видно увеличение скорости счета пылинок за несколько часов до и после пересечения терминатора, причем, наиболее значительным увеличением скорости счета было в области восхода Солнца.

Еще один “пылевой” эксперимент, выполненный по программе “Apollo”, был DDE (Dust Detector Experiment) (O’Brien, 2009). Он был предназначен для оценки скорости осаждения пылевых частиц на солнечные элементы по данным измерений их выходного напряжения. Результаты эксперимента показали осаждение пыли меньше, чем ожидалось, но последующий анализ данных привел авторов к заключению, что на полученные результаты влияли различные факторы, приводящие к частичному очищению поверхности солнечных элементов, например взлет десантного модуля с поверхности Луны, а также воздействие солнечной радиации (O’Brien, 2011).

С исторической точки зрения интересно отметить, что еще до обнаружения явлений динамики микрочастиц над поверхностью Луны Opik and Singer (1960) пришли к выводу, что поверхность Луны приобретает потенциал 20–40 В и на высотах в несколько сантиметров от поверхности может формироваться высокая напряженность электростатического поля. При этом, в работе (Grannis,

1961) отмечалось, что заряженная поверхность благодаря воздействию солнечного ветра, ударных явлений и радиации гипотетически могла вызвать эрозию реголита. На основе этого Singer и Walker (1962) обсуждали следствия электростатической зарядки лунного реголита, возможного “взвешивания” микрочастиц над поверхностью и их переноса. Реальные свидетельства левитации микрочастиц реголита над поверхностью привели к развитию теоретических и экспериментальных работ, направленных на объяснение плазменно-пылевых процессов в приповерхностной экзосфере. Модель левитации пылевых частиц под действием электростатических сил была развита в работах (Nitter и др., 1998; Sickafoose и др., 2002; Poppe, Horanyi, 2010; Wang и др., 2009; Mishra, Bhardwaj, 2019; Popel и др., 2014; 2018 и др.).

Освещенная сторона Луны. Для освещенной стороны Луны в условиях солнечного ветра плотность фототока J_{ph} от воздействия солнечного УФ- и мягкого X-излучения обычно на порядок выше токов электронов J_e и ионов J_i солнечного ветра $|J_{ph}| \gg |J_e| \gg |J_i|$, а также вторичного излучения электронов лунной поверхностью (Stubbs и др., 2014), поэтому основной вклад в формирование электрического заряда реголита в условиях солнечного ветра оказывает фотоэмиссия и поверхность реголита приобретает положительный заряд.

Измерения потенциала поверхности Луны были выполнены с помощью эксперимента SIDE (Su-

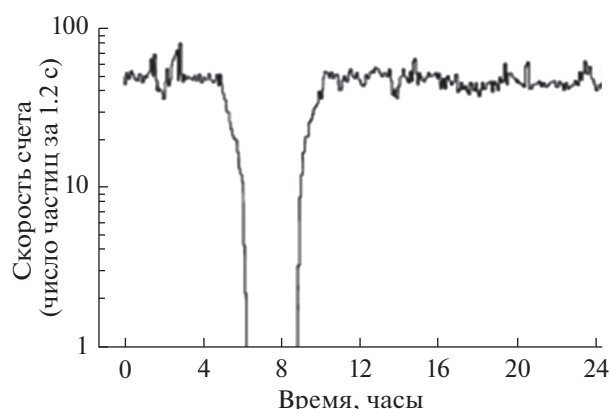


Рис. 6. Скорость счета прибора CPLEE на поверхности Луны. При пересечении центральной части геомагнитного хвоста на Луне произошло затмение Солнца. На графике этот интервал между 5 и 9 ч (Reasoner, Burke, 1972).

prathermal Ion Detector Experiment), развернутого в местах посадки аппаратов “Apollo-12, -14 и -15” (Freeman, Ibrahim, 1975). Результаты этого эксперимента показали, что электрический потенциал поверхности Луны в диапазоне широт $\pm 45^\circ$ от подсолнечной области составляет около +10 В. С увеличением зенитного угла Солнца, потенциал быстро падает, у терминатора становится отрицательным и может составлять –100 В (Freeman, Ibrahim, 1975).

Энергия фотоэлектронов, выбитых с поверхности реголита солнечным УФ-излучением, находится в диапазоне от 4 до 1 эВ (Willis и др., 1973). Эти данные были получены в наземной лаборатории при облучении образцов лунного реголита фотонами в диапазоне ~50–200 нм (21–4 эВ). При этом было также получено, что эффективность фотоэмиссии образцов лунного реголита составляет 2.8×10^9 электронов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (фототок ~4.5 $\mu\text{A m}^{-2}$) (Willis и др., 1973; Feuerbacher и др., 1973). Учитывая невысокую энергию фотоэлектронов и принимая Максвелловское распределение по энергиям, Дебаевская длина у поверхности и приповерхностный плазменный слой составляет около 70 см (Colwell и др., 2007).

Непосредственное доказательство существования фотоэлектронного слоя над поверхностью Луны было получено с помощью эксперимента CPLEE (Charged Particle Lunar Environment Experiment), выполненного по программе экспедиции “Apollo-14” (Reasoner, Burke, 1972). Прибор CPLEE имел возможность регистрировать потоки электронов в диапазоне 40–200 эВ. При пересечении геомагнитного хвоста скорость счета обычно менялась слабо. Однако во время затмения Солнца, которое произошло при пересечении Луной центральной части хвоста, скорость счета прибора упала до нуля. Авторы пришли к

выводу, что прибор до входа в тень и после выхода из нее, регистрировал фотоэлектроны. На рис. 6 представлено изменение скорости счета электронов прибором CPLEE при пересечении центральной части геомагнитного хвоста, во время которого произошло затмение Солнца (Reasoner, Burke, 1972).

Численное моделирование профиля плазменного слоя на освещенной стороне Луны показывает, что у поверхности при нормальных условиях солнечного ветра, концентрация фотоэлектронов составляет около 10^2 см^{-3} . С высотой эта величина уменьшается, начинают влиять электроны солнечного ветра и на высоте порядка 10 м плазма становится практически электронейтральной (Colwell и др., 2007; Poppe, Horanyi, 2010; Lisin и др., 2013). При этом вектор электрического поля направлен вверх. Его значение изменяется от нескольких вольт у поверхности до нуля на высоте около 10 м. Детальный анализ распределения электрического поля с высотой показывает, что на освещенной стороне Луны при учете электронов солнечного ветра на высотах 10–30 м формируется противоположно направленное поле (к поверхности), так наз. “мертвая зона”. В этом диапазоне высот левитация пылевых частиц невозможна (Poppe и Horanyi, 2010; Burinskaya, 2014; Lisin и др., 2013; 2015). На рис. 7 представлен рассчитанный ход концентрации компонентов плазмы и изменение напряженности электростатического поля с высотой.

При вычислениях вертикального профиля плотности плазмы и изменения электрического поля, рассмотренных выше, учитывались фотоэлектроны, выбитые только с поверхности реголита. В работе (Popel и др., 2018) в дополнение к этому были учтены также фотоэлектроны, эмитированные с пылевых частиц, левитирующих над поверхностью. На рис. 8 представлено распределение концентрации электронов над освещенной поверхностью Луны с высотой для широты 77° . На графике указан вклад фотоэлектронов, эмитированных с поверхности реголита ($El_{ph} \text{ surface}$) в приполярной области (77°), с поверхности пылевых частиц ($El_{ph} \text{ dust}$) левитирующих над поверхностью, и электронов солнечного ветра (El_{sw}).

Параметры пылевых частиц взвешенных в лунной экзосфере не были измерены, однако, существуют многочисленные оценки. Например, в работе (Criswell, 1973), как было указано выше, по данным наблюдений приповерхностных свечений оценки среднего размера и концентрации взвешенных частиц 10 мкм и 50 част. см^2 (в колонке) соответственно. В статье Popel и др., 2018 в результате численного моделирования получено, что над освещенной поверхностью Луны скорость пылевых частиц, взлетающих с поверхности, составляет несколько десятков сантиметров

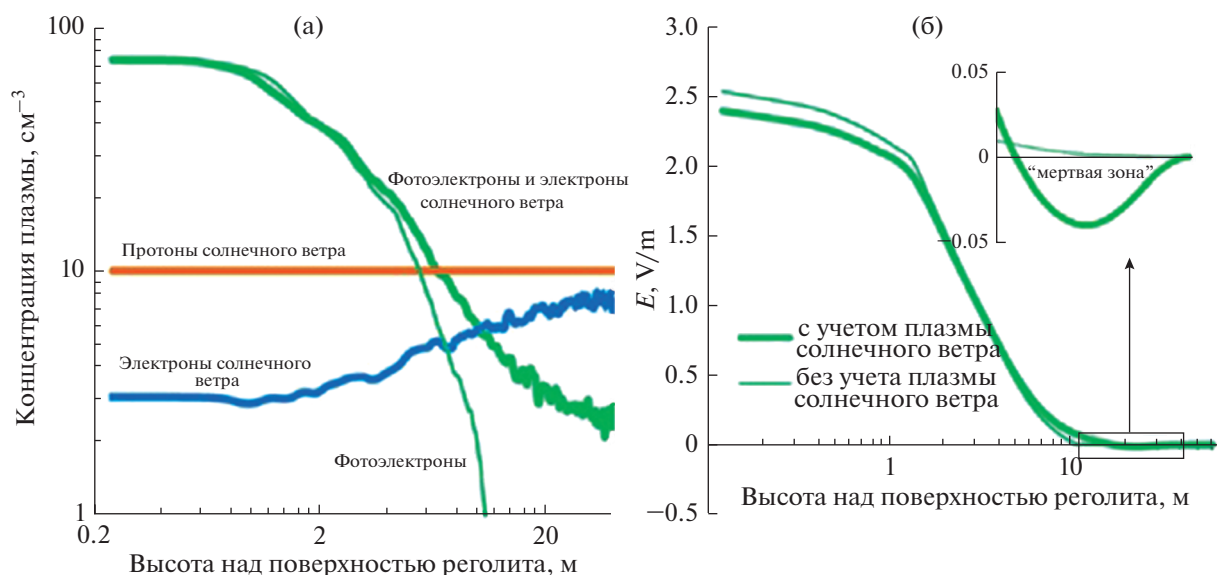


Рис. 7. Численное моделирование изменения плотности плазмы (а) и напряженности электрического поля (б) с высотой (Lisin и др., 2013). Толстые линии указывают значения концентрации и напряженности электрического поля, полученные с учетом электронов и протонов солнечного ветра. Тонкая линия на правом и левом рисунках указывает ход этих параметров с высотой для однокомпонентной плазмы — только фотоэлектроны, без учета плазмы солнечного ветра.

в секунду, а концентрация субмикронных частиц (~ 100 нм) у поверхности — порядка 10^3 см^{-3} . На рис. 9 представлен пример результатов моделирования концентрации пылевых частиц для высокоширотной области Луны (77°). При выполнении этих оценок учитывалось, что распределение пылевых частиц реголита по размерам в диапазоне 100 нм—500 мкм согласуется с распределением Колмогорова (Adushkin и др., 2007). Существуют много других оценок концентрации пылевых частиц над освещенной поверхностью Луны, однако, они могут различаться на несколько порядков (например, Severny и др., 1973; McCoy, Criswell, 1976; Stubbs, 2007b; Glenar и др., 2011; Grun и др., 2011).

Кроме приповерхностных свечений на высотах около метра, зарегистрированных посадочными аппаратами “Surveyor”, несколько наблюдений указывали также на свечения на больших высотах. В частности, астрофотометр Лунохода-2 (Severny и др., 1975), направленный в зенит, в то время когда он находился за терминатором, обнаружил рассеяние света на облаке пылевых частиц, которое, как показали оценки, находилось на высоте ~ 260 м от поверхности Луны. Кроме этого, астронавты орбитального модуля экспедиции “Apollo-17” (McCoy, Criswell, 1974; Zook, McCoy, 1991) наблюдали, а затем звездный датчик лунного орбитального аппарата “Clementine” получил изображения свечения над лунным горизонтом (Zook и др., 1995). Во всех этих наблюдениях свечение происходило на значительно больших высотах ~ 10 – 20 км (Zook и др., 1995). Такие свече-

ния вряд ли могли явиться следствием левитации субмикронных частиц в приповерхностном двойном слое, и в работе (Stubbs и др., 2006) был предложен так называемый “фонтанный” механизм динамики пылевых частиц. В соответствии с этим

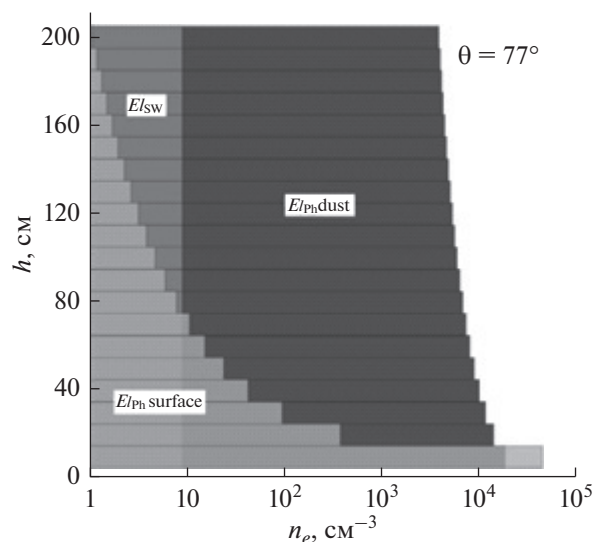


Рис. 8. Модельное распределение концентрации электронов солнечного ветра El_{sw} ; фотоэлектронов, эмитированных с поверхности реголита $El_{ph,surface}$ и фотоэлектронов, эмитированных с поверхности левитирующих пылевых частиц $El_{ph,dust}$ над поверхностью приполярной области Луны (широта 77°). В расчетах было принято: работа выхода $W = 6$ эВ и средние значения параметров спокойного солнечного ветра (Popel и др., 2018).

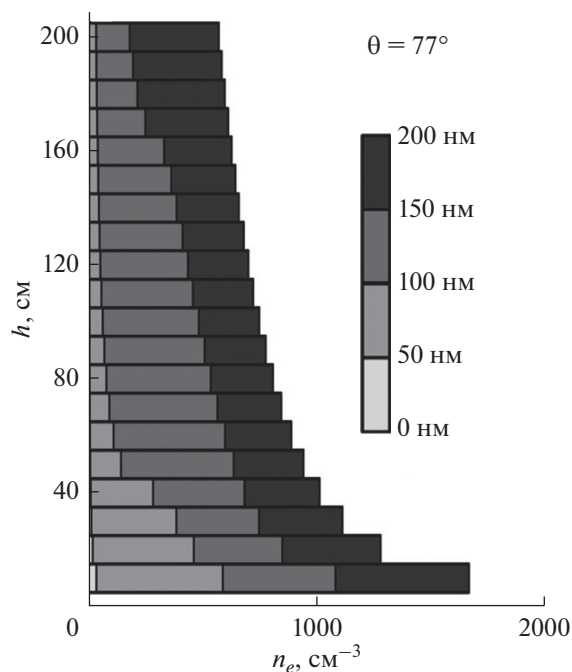


Рис. 9. Распределение пылевых частиц над поверхностью приполярных областей Луны (на широте 77°). Длина горизонтальных отрезков соответствующего размера с разными оттенками серого соответствуют концентрации частиц в см^{-3} . Общая длина горизонтального отрезка на каждой высоте соответствует общей концентрации пылевых частиц на данном расстоянии от поверхности реголита (Popel и др., 2018).

механизмом, свечение на больших высотах связано с частицами, которые под действием электростатического ускорения поднялись на большие высоты. Этот механизм может быть реализован в том случае, если после отрыва от поверхности, кулоновская сила, действующая на частицу, больше силы тяжести $qE > mg_L$. В соответствии с моделью “фонтанного” механизма пылевые частицы реголита размером $\sim 0.01\text{--}0.1$ мкм могут подняться на высоты до 100 км над поверхностью Луны в районе терминатора.

Экспериментальным исследованиям распространения пылевых частиц на больших высотах от поверхности Луны был посвящен эксперимент LDEX (Lunar Dust Experiment) на борту спутника Луны LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) (Horanyi и др., 2014). Результаты измерения показали, что в тех случаях, когда спутник находился в солнечном ветре, на высотах более 3 км от поверхности Луны постоянно существует облако пылевых частиц, плотность которого $n_d < 100 \text{ м}^{-3}$. При пересечении геомагнитного хвоста концентрация частиц составляла $n_d < 40 \text{ м}^{-3}$. Результаты LDEX не подтвердили, как ожидалось, повышения плотности пылевых частиц у терминаторов, где астронавтами пилотируемого

корабля Apollo наблюдались световые всплески в районе терминатора. При этом, регулярные метеорные потоки вызывали устойчивые повышенные уровни плотности пылевого облака. Поэтому авторы эксперимента LDEX пришли к выводу, что параметры этого облака согласуются с выбросами микрочастиц, образующихся при постоянной бомбардировке поверхности Луны спорадическими потоками межпланетной пыли. Подобные выводы были сделаны и по результатам спектрометрических наблюдений в УФ-диапазоне распространенности пылевых облаков с частицами размеров несколько десятков нанометров. Такие измерения были выполнены со спутников Луны LADEE (прибор UVS (Wooden и др., 2016)) и LRO (прибор LAMP (Grava и др., 2017)). При этом следует отметить, что большинство частиц пыли, образующихся при метеоритных ударах, не имеют достаточной энергии, чтобы преодолеть гравитацию Луны, и они возвращаются на поверхность по баллистическим орбитам.

Исследования взаимодействия солнечного ветра с лунным реголитом было выполнено на лунных спутниках Kaguya (Saito и др., 2008) и Chandrayaan-1 (Goswami, Annadurai, 2009). Было показано, что $\sim 10\text{--}20\%$ ионов солнечного ветра отражается и рассеивается от поверхности, причем скорость этих ионов $\sim 80\%$ скорости солнечного ветра. Основная часть отраженных ионов, захватывая электрон, как и ожидалось, нейтрализуются (Crider, Vondrak, 2002), становясь энергичными нейтральными атомами (NEAs) (Wieser и др., 2009). Небольшая часть этих ионов ($0.1\text{--}1\%$) остаются заряженными (Saito и др., 2008; Holmstrom и др., 2010). Образованные энергичные нейтральные атомы (NEAs), как впрочем, и другие нейтралы, плотность которых достаточно большая над поверхностью Луны ($\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$), имеют большое время фотоионизации, поэтому вклад фотоэлектронов и ионов в приповерхностную плазму от ионизации нейтралов оказывается незначительный (Stubbs и др., 2011).

Терминатор, ночная сторона Луны и геомагнитный хвост. У терминатора и в областях полярного региона Луны, где угол Солнца, а, следовательно, фототок j_{ph} близки к нулю, и на ночной стороне Луны поверхностный заряд и характер формирования плазменного слоя определяется балансом токов ионов и электронов солнечного ветра. При этом, в связи с тем, что тепловая скорость электронов солнечного ветра много больше скорости ионов ($\sim 1900 \text{ км/с}$ для электронов и $\sim 45 \text{ км/с}$ для ионов), поверхность Луны в тени приобретает отрицательный заряд, близкий к значению электронной температуры. В образующемся приповерхностном двойном слое, определяемым длиной Дибая, плазма не нейтральна. Градиент потенциала направлен к поверхности от электри-

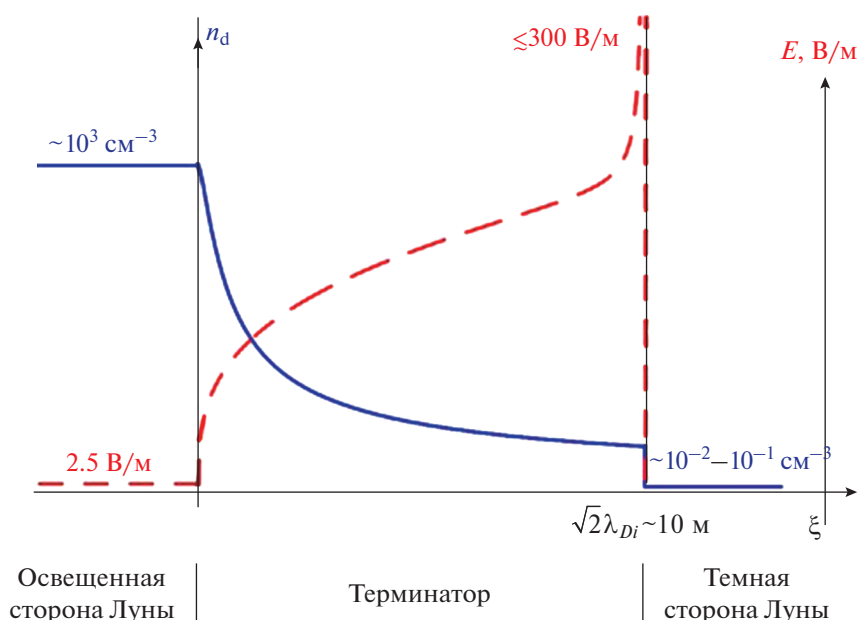


Рис. 10. Схема изменений концентрации пылевых частиц n_d над поверхностью Луны (сплошная линия) и приповерхностного электрического поля E (пунктирная линия) в области терминатора, на границе освещенной и теневой стороны Луны (Popel и др., 2015).

чески нейтральной плазмы вне плазменного слоя. Формирование двойного слоя на ночной стороне Луны был детально рассмотрен в работах (Borisov, Mall, 2002; 2006). Авторами была предложена двухмерная модель распределения электрического поля в двойном слое. Было показано, что распределение электрического поля над поверхностью существенно зависит от проводимости реголита. Кроме того, учитывая высокую эффективность вторичной электронной эмиссии, этот фактор может также влиять на электростатический потенциал поверхности (Halekas и др., 2008).

Условия левитации пылевых частиц в приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере для области терминатора рассматривались в работах (Farrell и др., 2007; 2008a, 2008b; Popel и др., 2015; 2018). В работе (Popel и др., 2015) показано, что в окрестности терминатора существует область, которая представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме над освещенной частью Луны за счет электростатических сил удерживаются электроны. Ширина плазменной возмущенной области, связанной с терминатором, составляет величину порядка ионного дебаевского радиуса ($\sim 10 \text{ м}$). В этой области возникают значительные электрические поля ($E \sim 300 \text{ В/м}$), которые могут приводить к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров и рассеянию солнечного света, которое наблюдалось космическими аппа-

ратами Surveyor в области лунного терминатора. Для пылевых частиц с размерами порядка 100 нм оценка их концентрации над темной частью Луны дает $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$. Учитывая, что оценки концентрации левитирующих пылевых частиц на освещенной стороне Луны (рассмотренные выше) давали значения концентрации порядка 10^3 см^{-3} (Popel и др., 2015; 2018), имеется существенный скачок концентрации пыли в области терминатора. Модельное представление изменений приповерхностного электрического поля и хода концентрации пылевых частиц над поверхностью было представлено в работе (Popel и др., 2015). На рис. 10 схематично представлены изменения концентрации пылевых частиц над поверхностью Луны (сплошная линия) и электрического поля (пунктирная линия) в области терминатора.

Процессы в плазменно-пылевой системе Луны вблизи терминатора не до конца изучены. Имеющиеся измерения в районе терминатора *in situ* прибором Lunar Ejecta and Meteorite (LEAM), развернутым на поверхности Луны астронавтами экспедиции “Apollo-17” (Berg и др., 1976) почти полвека назад, пока только поставили вопросы, решение которых предстоит в последующих исследованиях.

При пересечении геомагнитного хвоста Луна не подвергается прямым потокам солнечного ветра и во внутренних областях хвоста из-за быстрых вариаций потоков плазмы в плазменном слое магнитосферы изменения поверхностного заряда Луны могут быть значительными (Halekas и др.,

2011; Vaverka и др., 2016). Исследования электростатического потенциала поверхности на ночной стороне Луны была выполнена с борта спутника “Lunar Prospector” с помощью электронного рефлектометра LR ER (Lunar Prospector Electron Reflectometer). Было получено, что на ночной стороне Луны потенциал поверхности отрицательный и составлял -100 В в высокоширотных областях (lobes) геомагнитного хвоста и от -200 В до -1 кВ в плазменном слое. При возрастании солнечной активности потенциал поверхности может достигать -4 кВ (Halekas и др., 2008). Неожиданным результатом оказалось то, что при пересечении геомагнитного хвоста данные измерений прибором LP ER иногда показывали значения отрицательного потенциала поверхности даже на дневной стороне Луны. Это не соответствует современным представлениям о формировании потенциала освещенной поверхности и оставляет вопросы для дальнейших экспериментов и теоретического анализа. Измерения с орбитального аппарата позволили также построить глобальную карту усредненного потенциала поверхности Луны в условиях солнечного ветра и плазменного хвоста (Halekas и др., 2011).

Проблема отрыва микрочастиц от поверхности реголита. Модельные представления о динамике пыли, выполненные ранее, и, в частности, упомянутые выше, как правило, не учитывали адгезивные силы Ван дер Вальса F_a . Связано это прежде всего с тем, что ввиду достаточно широкого спектра размеров и особенностей форм пылевых частиц, силы сцепления между ними и с поверхностью, которые зависят от многих факторов, трудно поддаются анализу. А в тех случаях, когда предпринимались попытки учета сил адгезии, их приблизительные оценки показывают, что эти силы могут в тысячи или даже миллионы раз превышать силу тяжести F_g микронной и субмикронной пылинки с радиусом r_d (Li и др., 2006; Hartzell, Scheeres, 2011). Для относительно больших пылевых частиц, характерный размер которых больше 10^3 мкм, силы адгезии ($F_a \propto r_d$) становятся несущественными с сравнении с гравитационной силой ($F_g \propto r_d^3$) (Hartzell, Scheeres, 2011). Поэтому для микронных и субмикронных частиц учет сил сцепления Ван дер Вальса является определяющим для объяснения их отрыва от поверхности под действием электростатических сил. Условием отрыва пылевой частицы, лежащая на поверхности реголита и получившей положительный заряд в результате фото-ионизации, является превышение действующей на нее электростатической силы $F_e = qE$ над суммой сил, удерживающих эту частицу на поверхности: гравитационной силы F_g и силы адгезии F_a (Lee, 1995; Hartzell, Scheeres, 2011). Чтобы сила F_e при среднем электростатическом поле $E \sim 10$ В/м

(Freeman, Ibrahim, 1975) на освещенной стороне Луны могла поднять пылинку диаметром, например 1 мкм, преодолев только силу гравитации, она должна иметь достаточно большой заряд $q \approx 1500 e$ (Rosenfeld, Zakharov, 2020) (при этом учитывается величина ускорения свободного падения на Луне $g_L \approx 1.6 \text{ м с}^{-2}$ и плотность материала реголита $\rho \approx 3000 \text{ кг м}^{-3}$). В связи с этим возникают вопросы, каким образом микроскопическая пылинка, лежащая на поверхности реголита, может накопить такой большой заряд, необходимый для ее подъема, преодолев не только силу гравитации, но и силу адгезии. Чтобы оторвать микронную или субмикронную частицу от поверхности реголита электростатической силой необходимо, чтобы либо ее заряд был очень большим, либо электрическое поле имело очень большое значение напряженности. Однако имеющиеся экспериментальные результаты этого не подтверждают. В работе (Hartzell, Scheeres, 2011), посвященной анализу роли сил адгезии, действующей на микрочастицы, также не был найден механизм, объясняющий отрыв пылевые частицы от поверхности Луны. Попытки решить этот вопрос рассматривались в работах (Sheridan и др., 1992; Flanagan, Goree, 2006; Sheridan, Hayes, 2011; Sheridan, 2013), однако, этот вопрос остается открытым.

Подход к решению этой проблемы был рассмотрен в работах (Rosenfeld, Zakharov, 2018; 2020). Было обращено внимание, что измеренное приповерхностное поле можно считать однородным только если предположить, что заряд на поверхности распределен равномерно. В действительности, процесс заряда микрочастиц, лежащих на поверхности реголита, имеет дискретный и стохастический характер. В таком случае под действием УФ-излучения или потоков плазмы на любом участке диэлектрической поверхности случайным образом возникают флуктуирующие зарядовые пятна разного знака. В этих статьях аналитически показано, что возникающие при этом флуктуации плотности заряда внутри такого пятна, могут на несколько порядков превышать среднюю плотность заряда на поверхности. При этом заряд микрочастицы, лежащей внутри такого зарядового пятна, и напряженность локального электрического поля непосредственно над таким пятном, будет на несколько порядков больше среднего по поверхности значения. В этих условиях локальная кулоновская сила может превышать силы адгезии и оторвать частицу от поверхности. Оторвавшись от участка поверхности с высокой локальной плотностью заряда и высоким локальным электрическим полем, которые изменяются стохастически, пылевая частица попадает в область, где электрическое поле определяется средней величиной поверхностного заряда и левитирует в этой области. Между тем авторы (Rosenfeld, Zakharov, 2020) отмечают, что представ-

ленное в работе аналитическое рассмотрение показывает лишь подход к решению проблемы и требует дальнейшей разработки с целью создания более строгой теории зарядовых флуктуаций на непроводящей поверхности. Следует заметить, что подобный подход к рассмотрению зарядовых флуктуаций на поверхности был использован также в недавней работе (Mishra, 2020).

Другим механизмом, конкурирующим с силой адгезии, могут быть тепловые флуктуации субмикронных частиц. С учетом таких термодинамических процессов тепловая энергия достаточно малых частиц может превышать энергию сцепления между ними, и тогда такой порошок будет вести себя как газ. Это значит, что при повышении температуры связи между частицами могут ослабляться, конгломераты пылевых частиц на поверхности реголита могут распадаться и объемная плотность верхнего слоя реголита увеличивается с повышением температуры. В таком случае поведение частиц можно представить, как их “кипение” на поверхности. Подобный механизм был рассмотрен в работе (Rosenfeld и др., 2016). Кроме того, в соответствии с принципом равномерного распределения тепловой энергии по степеням свободы, кроме линейных флуктуаций следует принимать во внимание их собственное вращение. На дневной стороне Луны, где температура реголита может принимать значение $T \approx 400\text{ K}$ (Vaniman и др., 1991), оценки показывают, что для частиц с характерными размерами от нескольких десятков нанометров ($m \sim 10^{-21}\text{ кг}$) до нескольких микрометров ($m \sim 10^{-15}\text{ кг}$), их скорость вращения может составлять от нескольких тысяч до десятков миллионов оборотов в секунду. Оторвавшись от поверхности и левитируя над поверхностью Луны, собственное вращение пылевые частицы может являться одним из определяющих свойств их агрессивного влияния на инженерные системы посадочных аппаратов (см. следующий раздел).

На сегодняшний день представляется, что процессы отрыва пылевых частиц от поверхности и их динамика сложнее, чем предполагалось ранее, и существующие модели требуют коррекции. Для объяснения отрыва частиц от поверхности, по-видимому, следует основываться не только на усредненном описании приобретения электростатического заряда пылевыми частицами, лежащими на поверхности, но учитывать статистические процессы, основанные на дискретном характере взаимодействия плазмы и УФ-излучения с реголитом. Предварительное рассмотрение показывает, что термодинамические процессы также могут играть роль в процессах отрыва субмикронных частиц от поверхности. Эти модели должны объяснить, каким образом пылевые частицы у поверхности Луны проявляют себя, не только рассеивая солнечный свет, наблюдаемый у тер-

минатора, но и те неожиданные эффекты пылевой активности, с которыми столкнулись американские астронавты во время пребывания на поверхности Луны при выполнении пилотируемой программы “Apollo”. Эти вопросы будут рассмотрены в следующем разделе.

ТОКСИЧНОСТЬ ЛУННОЙ ПЫЛИ

Лунная пыль оказалась наиболее неожиданным и наиболее неприятным эффектом, с которым толкнулись американские астронавты. Это было отмечено в отчетах астронавтов и в многочисленных научных публикациях, обсуждающих влияние лунной пыли на системы и оборудование посадочных аппаратов, на условия пребывания и деятельность астронавтов на поверхности Луны (например, Katzan, Edwards, 1991; Gaier, 2005; Christoffersen и др., 2009; Murphy и др., 2010; Linnarsson и др., 2012; Stubbs и др., 2007; Calle и др., 2009). Причем, рассмотрение токсичности лунной пыли следует рассматривать не только как следствие природных эффектов подъема и левитации пылевых частиц, вызванных воздействием внешних природных факторов на реголит, что обсуждалось в предыдущем разделе. Опыт выполнения программы “Apollo” показал, что динамика лунной пыли у поверхности наиболее активно происходит в результате антропогенного воздействия на приповерхностную среду (Gaier, 2005). Термин “токсичность” лунной пыли здесь используется не только как свойство лунной пыли в биомедицинском применении, но и в более широком значении ее негативного воздействия на деятельность астронавтов и инженерные системы посадочных аппаратов.

Подъем пыли с поверхности происходит при работе реактивных двигателей при посадке и взлете посадочных аппаратов, работе механических систем аппарата (например, бурильной установки) на поверхности Луны, активности астронавтов, передвижении их по поверхности (Gaier, 2005). Некоторые системы посадочных аппаратов чувствительны к осаждению на них пыли, например, системы теплового контроля, оптические поверхности. Кроме того, посадочный аппарат и астронавт на поверхности Луны вызывает возмущение в системе естественно сформировавшихся электростатических полей, которым подчиняется динамика заряженных пылевых частиц, что также меняет картину динамики пыли (Stubbs и др., 2007a). Все это антропогенные факторы вызывает изменение естественной динамики пылевых частиц, левитирующих над поверхностью реголита, и приводят к более активному влиянию пыли на системы посадочного аппарата, на деятельность человека и его здоровье.

Влияние пыли на оптические поверхности исследовались в течение нескольких десятилетий со

времени пионерских исследований Луны. Такие длительные исследования оказались возможными благодаря тому, что на поверхности Луны были развернуты несколько отражательных систем для лазерной локации. Лазерные отражатели были установлены на Луноходе-2 (Severny и др., 1975) и при выполнении программы “Apollo” (Murphy и др., 2010). После взлета посадочного аппарата с поверхности Луны и в первые несколько месяцев наблюдений сигнал от лазерного отражателя, установленного “Apollo-14”, не показывал существенной деградации. Однако через почти 40 лет работы этих систем на поверхности Луны по данным (Murphy и др., 2010), сигнал, отраженный от лазерного отражателя, установленного с помощью “Apollo” стал слабее в 10 раз. Сигнал от лазерных отражателей Лунохода-2 в начале своей эксплуатации был на порядок выше, чем от отражателя “Apollo-14”, но через 40 лет его величина стала на порядок ниже, чем у “Apollo-14”. Такой эффект может быть связан с конструктивными особенностями угловых отражателей и с осаждением пыли, которая может уменьшать их отражательную способность. Кроме того, открытая оптика может оказаться под непосредственным воздействием частиц, связанных с микрометеоритной бомбардировкой. Во всяком случае, анализ работы этих систем в течение нескольких десятилетий показал, что оптические системы достаточно успешно выполняли свои функции, однако, постепенная деградация оптики фиксировалась на временном масштабе порядка десятилетия (Murphy и др., 2010).

Анализ воздействия лунной пыли на системы посадочного аппарата и деятельность астронавтов на поверхности Луны при выполнении шести экспедиций “Apollo” на поверхности Луны был представлен в отчете (Gaier, 2005). Автор систематизировал все обнаруженные эффекты влияния лунной пыли по девяти категориям: ухудшение видимости при поднятии пыли, ложные показания приборов, осаждение пыли и загрязнение поверхностей, потеря сцепления с грунтом при движении по поверхности, заклинивание вращающихся узлов механизмов, активная эрозия поверхностей, проблемы с системой терморегулирования, нарушение уплотнений и герметичности систем, проблемы с дыханием и другие факторы, связанные со здоровьем человека. В отчете подробно рассмотрен каждый из упомянутых категорий. Хотя для некоторых указанных категорий обычные методы уменьшения влияния пыли были достаточны (например, потеря сцепления при движении), в большинстве случаев простые методы были неэффективны. Это прежде всего относится к таким эффектам, как заклинивание вращающихся узлов, эрозия, уменьшение отвода тепла, нарушение герметичности. Ниже приведены основные эффекты влияния лунной

пыли на деятельность астронавтов, представленные в отчете (Gaier, 2005).

С проблемой ухудшения видимости впервые столкнулись астронавты во время посадки при работающих двигателях лунного модуля “Apollo-11”. Приблизительно на высоте 30 м от поверхности возникло облако пыли, которое становилось все плотнее по мере уменьшения высоты. Была угроза, что одна из посадочных опор коснется крупного камня или попадет в небольшой кратер. Поэтому для посадки следующих аппаратов “Apollo-14, -15 и -16” на поверхность Луны, профиль посадки был скорректирован, использовался более крутой профиль приземления. Тем не менее, и в этих случаях были трудности при осмотре площадки перед контактом с поверхностью. С проблемой видимости из-за пыли был связан и тот факт, что датчики скорости посадки аппаратов “Apollo-12 и -15” давали ложные показания из-за облака пыли, возникшего при работе двигателей, обеспечивающих мягкую посадку аппарата (Gaier, 2005).

Лунная пыль оказалась крайне абразивной. Астронавты отмечали, что после работы вне посадочного модуля циферблаты приборов и солнцезащитные козырьки их шлемов были настолько исцарапаны, что невозможно было прочитать показания. После 8 ч работы скафандры и перчатки, особенно после работы по бурению грунта, имели значительные потертости и, если бы возникла необходимость выполнить один или два дополнительных выходов из посадочного модуля, они могли бы потерять герметичность (Gaier, 2005). Например, скафандр Пита Конрада (Pete Conrad, Jr.), командира миссии “Apollo-12”, который был герметичным до первого выхода из посадочного модуля, терял давление ~0.01 атм./мин после первого выхода и ~0.017 атм./мин после второго выхода. Так как безопасная утечка составляла 0.02 атм./мин, была сомнительна безопасность третьего выхода, если бы он был запланирован. Пыль, проникшая в подвижные узлы скафандра привела к таким большим затруднениям при движении, что еще один запланированный выход из посадочного модуля был бы невозможен (Gaier, 2005). Застежками на скафандрах типа “молния” после работы вне посадочного модуля было невозможно пользоваться. Из-за воздействия пыли герметичность всех запечатанных образцов лунной атмосферы, доставленных на Землю, была нарушена и таким образом все они оказались бесполезными. Отмечалось, что при долгосрочном пребывании на Луне и сохранения безопасных условий среды обитания, следует уделять больше внимание способам обеспечения герметичности аппарата, скафандров, создания более пылеустойчивых уплотнений.

При работе астронавтов на поверхности было обнаружено, что пыль быстро покрывает все поверхности, с которыми она контактировала, включая скафандры, обувь астронавтов, ручной инструмент, оборудование и системы аппарата. Осаждение пыли требовало от астронавтов выполнения дополнительной работы по очистке одежды, оборудования, однако, это оказывалось неэффективным (Gaier, 2005). Следует, однако, отметить, что при выполнении миссии “Apollo-14” был поставлен эксперимент TDS (Thermal Degradation Sample) для изучения поглощательной и излучательной способности различных поверхностей при осаждении на нее пыли. Две идентичные панели, содержащие по 12 образцов поверхности с различными свойствами, были покрыты пылью астронавтами в лунной среде, а затем возвращены на Землю (Gaier, 2012). Адгезия пыли к TDA оказалась меньше, чем ожидалось. Было сделано заключение, что это произошло из-за “загрязнений поверхности на атомном уровне”.

Осаждение пыли приводило к таким неприятным эффектам, как заклинивание движущихся узлов, нарушение процессов терморегулирования. Такие сообщения от астронавтов поступали при каждой экспедиции посещения поверхности Луны. Серьезные проблемы вызывал слой пыли на поверхности радиатора системы терморегулирования. Попытки удалить эту пыль в лунных условиях были неэффективными, что противоречило результатам наземных испытаний и результатам эксперимента TDS. Это приводило к тому, что рабочая температура некоторых систем превышала ожидаемую на 20°C и отдельные приборы аппаратов “Apollo-16 и -17” из-за перегрева ухудшили свои характеристики. Именно из-за этого факта Джон Янг (John Young), командир экспедиции “Apollo-16”, заметил, что “пыль — это проблема номер один при возвращении на Луну” (Gaier, 2005).

Однако опыт выполнения программы “Apollo” показал, что самым неприятным фактором лунной пыли является ее влияние на здоровье человека, прежде всего на раздражения и вдыхания лунной пыли. Экипажи экспедиций Apollo сообщали, что лунная пыль характеризуется резким запахом, напоминающим порох, что видимо, является следствием присутствия летучих веществ на поверхности пылевых частиц. Пыль проникала сквозь одежду астронавтов и, сняв одежду, астронавты обнаруживали, что покрыты пылью. Попадая в лунный модуль, во время полета к Земле, в условиях отсутствия гравитации, пыль распространялась по объему космического аппарата. Экипаж дышал этой атмосферой с пылью, она раздражала глаза (Gaier, 2005). Имевшиеся на борту средства очистки от пыли, были не эффективны. При подготовке более поздних миссий “Apollo” было учтено это свойство лунной пыли и

были приняты меры, которые несколько уменьшили это влияние. Тем не менее, токсичность микронных и субмикронных частиц, которые были обнаружены на материале скафандров, указывает на необходимость постоянного контроля концентрации частиц внутри посадочного модуля, а в будущем в долгосрочной среде обитания (Christoffersen и др., 2009). На фото, представленном ниже Юджин Сернан (Eugene Cernan) командир миссии “Apollo-17” в запыленном скафандре в посадочном модуле после работы на поверхности Луны (фото НАСА, Linnarsson и др., 2012).



Фотография Юджина Сернана (Eugene Cernan), командира миссии “Apollo-17” в запыленном скафандре в посадочном модуле после работы на поверхности Луны. Фото NASA (Linnarsson и др., 2012).

Опыт выполнения программы “Apollo” показал, что при подготовке программы “Apollo” серьезность проблемы влияния пыли была недооценена. По-видимому, это связано с тем, что, динамика пыли, связанная с деятельностью человека на поверхности, оказалась значительно более выражена в сравнении с естественной природной динамикой пыли на дневной стороне Луны (Gaier, 2020). При выполнении программы “Apollo” больше внимания обращалось на исследования естественных процессов переноса пыли, чем на перенос пыли, вызванный деятельностью астронавтов. В работе (Kazan, Edwards, 1991) отмечается, что перенос пыли, связанной с деятельностью астронавтов и автоматических систем на поверхности Луны, может быть на порядки выше, чем перенос пыли в результате естественных природных процессов. Поэтому активные работы на поверхно-

сти Луны могут быть очень опасны как для астронавтов, так и для используемого оборудования.

Необычные свойства лунной пыли проникать сквозь уплотнения герметичных систем и “прилипать” к различным поверхностям могут быть рассмотрены с точки зрения динамических свойств левитирующих над поверхностью частиц лунной пыли. В разделе “Реголит и лунная пыль” упоминалось, что левитирующие субмикронные и микронные частицы при взаимодействии с поверхностью могут проявлять себя не просто как “ударники”. Левитируя, пылевые частицы могут быстро вращаться. Оценки, выполненные в работе (Rosenfeld и др., 2016) показывают, что скорость собственного вращения левитирующих микронных и субмикронных частиц на освещенной стороне Луны могут составлять от нескольких тысяч до десятков миллионов оборотов в секунду (см. раздел “Динамика лунной пыли”). Учитывая ударное происхождение таких частиц, их формы крайне не регулярны и часто заострены (Park и др., 2006b). Все это говорит о том, что подобные быстро вращающиеся частицы напоминают восточные метательные звездочки “сюрикэн” (shuriken или ninja stars), обладающие большой поражающей силой (Rosenfeld и др., 2016). Видимо именно эта особенность, в сочетании с имеющимся электростатическим зарядом лунной пыли, делает ее такой токсичной и объясняет удивительную способность агрессивно воздействовать на поверхности чувствительных систем приборов и посадочных аппаратов и проникать сквозь герметические уплотнители.

Опыт выполнения и анализ результатов программы “Apollo” показал, что для нового этапа активных исследований и освоения Луны с участием человека, необходимы дополнительные исследования направленные на более глубокое понимание плазменно-пылевых процессов, происходящих в приповерхностной экзосфере Луны, детальные исследования характеристик реголита, свойств и распределения по размерам пылевых частиц. Все эти исследования чрезвычайно важны для выработки рекомендаций по снижению влияния лунной пыли на инженерные системы и человека, находящихся на поверхности Луны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лунная среда чрезвычайно интересна с точки зрения естественной плазменной лаборатории. Она формируется в условиях вакуума, который значительно более глубокий, чем обычно воспроизводимый в лаборатории. Она подвержена потокам солнечного УФ-излучения, солнечного ветра или плазмы удаленного геомагнитного хвоста, микрометеоритов. Луна не обладает собственным магнитным полем, но на ее поверхности имеются локальные магнитные аномалии. Большое влия-

ние на плазменно-пылевую экзосферу оказывает временные вариации, связанные изменчивостью потоков солнечного ветра, с уровнем солнечной активности, постоянным изменением условий воздействия Солнца и геомагнитного хвоста, связанного с вращением Луны вокруг Земли. Формирование мелкодисперсной компоненты лунного реголита и среда, в которой она находится, делает лунную пыль особенной субстанцией, не имеющей аналогов на Земле. Выполненные к настоящему времени исследования лунной пыли, ее свойств, динамики, а также имеющиеся данные о внешних факторах, влиянию которых она подвержена, показывают, что взаимодействие этих разнородных объектов естественным образом создает новую среду с новым качеством — плазменно-пылевую экзосферу над поверхностью Луны. Имея в естественном состоянии, казалось бы, сравнительно скромные характеристики, плотность, температуру, эта среда крайне агрессивно воздействует на технологические системы и человека. Особенно это проявилось при выполнении пилотируемой программы “Apollo”. Отчеты о результатах выполнения экспедиций “Apollo” содержат обширную информацию о том, как лунная пыль влияла на посадочный аппарат, его инженерные системы, создавала трудности при работе астронавтов на поверхности Луны, проникала сквозь герметичные уплотнители, воздействовала на здоровье астронавтов. Такие агрессивные свойства лунной пыли характеризуют ее токсичность. Важно отметить, что астронавты находились на поверхности Луны только в дневное время лунных суток (Stubbs и др., 2012). Это время характеризуется относительно мягкими плазменно-пылевыми условиями, в отличие от значительно более активных областей в районах терминатора (см. рис. 5) или при возмущениях космической погоды. Опасность могут представлять электрические поля, свойственные лунной поверхности, которые зависят от особенностей внешнего воздействия, рельефа, и могут вызывать разряды между освещенными и затененными участками поверхности (Farrell и др., 2008; Jackson и др., 2011; Zimmerman и др., 2012).

Проявления лунной пыли, обнаруженные при выполнении автоматических и пилотируемых программ исследований Луны, положили начало созданию моделей ее динамики в приповерхностной среде. Выполнено большое число работ по аналитическому, численному и экспериментальному моделированию основных физических процессов, происходящих на поверхности Луны и при формировании плазменно-пылевой экзосферы над ее поверхностью. Небольшая часть этих работ, которая, на наш взгляд, позволяет представить картину процессов, связанных с динамикой лунной пыли, происходящих на Луне, представлена в данном обзоре. Может показаться, что

многое стало известно, и в некотором смысле, это действительно так. Однако в этой картине существуют откровенно “белые пятна”.

Например, загадочной областью по своим электрическим характеристикам остается область терминатора и области вблизи крупномасштабных неровностей поверхности (крупные кратеры, холмы), т.е. в районах, где существуют протяженные границы между освещенной и затененной поверхностями Луны (Farrell и др., 2007; Stubbs и др., 2014). В таких областях должны кардинально меняться условия возникновения зарядов на поверхности, и возникать значительные электрические поля с преимущественной горизонтальной составляющей.

Остаются недостаточно ясными процессы взаимодействия плазмы солнечного ветра с реголитом, которые на освещенной стороне Луны конкурируют с воздействием солнечного УФ-излучения. При спокойном солнечном ветре воздействие УФ-излучения превалирует над потоками плазмы, и потенциал поверхности формируется при условии “двухкомпонентного” потока — фотоэлектронов и электронов солнечного ветра. Однако при активном Солнце, во время вспышек, скорость солнечного ветра возрастает, и токи ионов на поверхности реголита могут сравниваться с токами электронов. В этом случае следует учитывать “трехкомпонентный” ток на поверхности, фотоэлектроны и две основные компоненты солнечного ветра. Подобный эффект происходит также при невысокой температуре электронов солнечного ветра (Stubbs и др., 2014). В любом случае для определения потенциала поверхности и параметров приповерхностного электрического поля важно иметь достоверные значения работы выхода фотоэлектронов (Porel и др., 2018) и результаты мониторинга основных параметров солнечного ветра у поверхности Луны и потоков вторичных электронов.

Чрезвычайно важным параметром для моделирования отрыва пылевых частиц от поверхности реголита является величина адгезии. Этот параметр очень сложно оценить, прежде всего, потому, что он во многом зависит от формы и свойств конкретных частиц, которые бесконечны по своему разнообразию. Столкнувшись с этой проблемой, в работе (Hartzell и др., 2014) сделано заключение, что “способ, с помощью которого пылевые частицы отрываются от поверхности безатмосферного тела, в настоящее время не известен”.

Аномальное свойство лунной пыли воздействовать на поверхности, оборудование посадочных аппаратов, проникать через герметические уплотнители, с которыми встретились американские астронавты на поверхности Луны при выполнении программы “Apollo” также требует физического понимания. Эти факторы влияния

лунной пыли стали ключевыми при подведении итогов программы “Apollo”. Именно поэтому наиболее важный вывод после выполнения программы Apollo в своем отчете сделал Юджин Сернан (Eugene Cernan), командир “Apollo-17” (Gaijer, 2005). Он сказал: “Я думаю, что пыль, вероятно, является одним из основных ограничителей планируемой работы на Луне. Я думаю, что мы можем преодолеть другие физиологические или физические или механические проблемы, кроме пыли”.

Опыт выполнения программы “Apollo” инициировал развитие нового направления научных и инженерных исследований — очистка поверхностей и уменьшение последствий (“mitigation”) влияния лунной пыли. Эта область исследований направлена на создание технологий уменьшающих влияние пыли в лунных условиях на системы и оборудование посадочных аппаратов, на деятельность человека на поверхности Луны, на здоровье и системы жизнеобеспечения. Это направление исследований, строится на модельных представлениях природных процессов, происходящих на поверхности реголита и в приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере, но должно учитывать более активную динамику лунной пыли при антропогенном воздействии.

Изучение природных и антропогенных процессов вблизи поверхности Луны требует мониторинга и изучения внешних факторов, действующих на Луну, их взаимодействие с реголитом, исследование динамических процессов в приповерхностной плазменно-пылевой экзосфере. В некоторых работах приводятся конкретные программы исследований и описания приборов, направленных на регистрацию и исследования параметров левитирующих пылевых частиц и параметров приповерхностной плазменно-пылевой среды (например, Stubbse и др., 2007a; Duncan и др., 2011).

На исследования Луны направлена программа, разработанная в Российской академии наук и включенная госкорпорацией “Роскосмос” в Федеральную космическую программу России. В соответствии с этой программой планируются выполнить несколько проектов по изучению Луны с помощью посадочных аппаратов на поверхности и исследования Луны с орбитального аппарата (Zelenyi, 2016). Эта программа уже находится в стадии подготовки. В состав научной аппаратуры посадочных аппаратов включен прибор для изучения динамики лунной пыли и параметров приповерхностной плазменно-пылевой среды (Kuznetsov и др., 2017). Если сроки запусков этих посадочных аппаратов сохраняться, есть надежда, что в ближайшем будущем после пятидесятилетнего перерыва возобновятся *in situ* изучения лунной пыли и среды, в которой она проявляет свою активность.

Статья была подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 19-12-50035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахматова М.В., Дементьев Б.В., Марков М.Н. Вода в реголите Моря Кризисов (“Луна-24”)? // Геохимия. 1978. № 2. С. 285–288.
- Иванов А.В., Назаров М.А. Исследования образцов реголита, доставленных автоматическими станциями серии “Луна” // Вестник НПО. 2012. № 4. С. 48–52.
- Колесников Е.К., Мануйлов А.С. Расчет напряженности электростатического поля над поверхностью Луны, покрытой монослоем водорода // Астрон. журн. 1982. Т. 59. № 5. С. 996–998.
- Родэ О.Д., Иванов А.В. Распределение частиц по размерам образцов реголита Луна-24 // Астрон. вестн. 1984. № 18. С. 1–3.
- Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного реголита (обзор) // Астрон. вестн. 2016. Т. 48. № 5. С. 358–382. (Sluta E.N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (A review) // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 5. P. 330–353.)
- Флоренский К.П., Иванов А.В., Базилевский А.Т. Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 439–452.
- Adushkin V.V., Pernik L.M., Popel S.I. Nanoparticles in experiments on destruction of rocks by explosion // Dokl. Earth Sci. 2007. V. 415. № 5. С. 820–822. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07050352>
- Agrell S.O., Scoon J.H., Muir I.D., Long J.V., McConnell J.D., Peckett A. Observation of the chemistry, mineralogy and petrology of some Apollo 11 lunar samples // Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. 1970. V. 1. P. 93–128.
- Asbridge J.R., Bame S.J., Strong I.B. Outward flow of protons from the Earth's bow shock // J. Geophys. Res. Space Physics 1968. V. 73. № 17. P. 5777–5782. <https://doi.org/10.1029/JA073i017p05777>
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment. In Interplanetary Dust and Zodiacal Light / Eds Elsasser H., Fechtig H. N.-Y.: Springer, 1976. P. 233–237.
- Bhardwaj A., Dhanya M.B., Alok A., Barabash S., Wieser M., Futaana Y., Wurz P., Vorbuerger A., Holmstrom M., Lue Ch., Harada Y., Asamura K. A new view on the solar wind interaction with the Moon // Geoscience Lett. 2015. 2: 10. P. 2–15. <https://doi.org/10.1186/s40562-015-0027-y>
- Borisov N., Mall U. The structure of the double layer behind the Moon // J. Plasma Physics. 2002. V. 67. № 4. P. 277–299. <https://doi.org/10.1017/S0022377802001654>
- Borisov N., Mall U. Charging and motion of dust grains near the terminator of the Moon // Planet. and Space Sci. 2006. V. 54. P. 572–580. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.01.005>
- Brownlee D., Bucher W., Hodge P. Primary and secondary micrometeoroid impact rate on the lunar surface: Direct measurement // Analysis of Surveyor 3 material and photographs returned by Apollo 12 / Eds Carroll W.F. et al. 1972. NASA-STIO. P. 143–150.
- Burinskaya T.M. Influence of the Solar Wind on the Distribution of the Electric Potential near the Moon's Surface // Plasma Physics Reports. 2014. V. 40. № 1. P. 14–20.
- Calle C.I., Buhler C.R., McFall J.L., Snyder S.J. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions // J. Electrostatics. 2009. № 67. P. 89–92. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.02.012>
- Carrier W.D. III, Lunar regolith grain size distribution // Moon. 1973. V. 6. P. 250–263.
- Carrier W.D. III, Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of lunar surface // The Lunar Sourcebook / Eds Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
- Christoffersen R., Lindsay J.F., Noble S.K., Meador M.A., Kosmo J.J., Lawrence J.A., Brostoff L., Young A., McCue T. Lunar dust effects on spacesuits systems insights from the Apollo spacesuits. NASA/TR-2009-214786. 2009.
- Clay D.R., Goldstein B.E., Neugebauer M., Snyder C.W. Lunar surface solar wind observations at the Apollo 12 and Apollo 15 sites // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 13. P. 1751–1760. <https://doi.org/10.1029/JA080i013p01751>
- Coleman P.J., Lichtenstein B.R., Russell C.T., Sharp L.R., Schubert G. Magnetic fields near the Moon // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1972. V. 36. P. 2271–2286.
- Colwell J.E., Batiste S., Horanyi M., Robertson S., Sture S. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics // Rev. Geophys. 2007. V. 45. RG2006/2007. <https://doi.org/10.1029/2005RG000184>
- Crider D.H., Vondrak R.R. Hydrogen migration to the lunar poles by solar wind bombardment of the moon // Adv. Space Res. 2002. V. 30. № 8. P. 1869–1874. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00493-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00493-3)
- Criswell D.R. Horizon-glow and the motion of lunar dust // In: Photon and particle interactions with surfaces in space / Eds Grad R.J.L., Reidel D. Publishing Co. Dordrecht. Holland 1973. P. 545–556.
- Criswell D.R., De B.R. Intense localized charging in the lunar sunset terminator region: 2. Supercharging at the progression of sunset // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 1005–1007.
- De B.R., Criswell D.R. Intense localized photoelectric charging in the lunar sunset terminator region: 1. Development of potentials and fields // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 999–1004.
- Duncan N., Sternovsky Z., Grün E., Auer S., Horanyi M., Drake K., Xie J., Lawrence G., Hansen D., Lea H. The Electrostatic Lunar Dust Analyzer (ELDA) for the detection and trajectory measurement of slow-moving dust particles from the lunar surface // Planet. and

- Space Sci. 2011. V. 59. P. 1446–1454.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.06.002>
- Eastwood J.P., Lucek E.A., Mazelle C., Mezaine K., Narita Y., Pickett J., Treumann R.A. The foreshock // Outer Magnetospheric Boundaries: Cluster Results / Eds Paschmann G., Schwartz S.J., Escoubet C.P., Haaland S. 2005. P. 41–94.
https://doi.org/10.1007/1-4020-4582-4_3
- Fa W., Liu T., Xie M., Du J. Regolith thickness over the Apollo landing sites from morphology of small fresh impact craters // 50th Lunar and Planetary Science Conference (LPI Contrib. No. 2132) 2019. 1765.pdf.
- Farrell W.M., Stubbs T.J., Vondrak R.R., Delory G.T., Halekas J.S. Complex electric fields near the lunar terminator: the near-surface wake and accelerated dust // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. P. 1–5.
- Farrell W.M., Stubbs T.J., Vondrak R.R., Delory G.T., Halekas J.S. Complex electric fields near the lunar terminator: The near-surface wake and accelerated dust // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L14201.
<https://doi.org/10.1029/2007GL029312>
- Farrell W.M., Stubbs T.J., Halekas J.S., Delory G.T., Collier M.R., Vondrak R.R., Lin R.P. Loss of solar wind plasma neutrality and effect on surface potentials near the lunar terminator and shadowed polar regions // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L05105.
<https://doi.org/10.1029/2007GL032653>
- Farrell W.M., Stubbs T.J., Delory G.T., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Lin R.P. Concerning the dissipation of electrically charged objects in the shadowed lunar polar regions // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L19104.
<https://doi.org/10.1029/2008GL034785>
- Feldman W.C., Lawrence D.J., Elphic R.C., Barraclough B.L., Maurice S., Genetay I., Binder A.B. Polar hydrogen deposits on the Moon // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 4175–4196.
<https://doi.org/10.1029/1999JE001129>
- Feuerbacher B., Willis R.F., Fitton B. Electrostatic charging and formation of composite interstellar grains // Photon and particle interactions with surfaces in space / Ed. Grard R.J.L. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. Holland. 1973. P. 415–426.
- Flanagan T.M., Goree J. Dust release from surfaces exposed to plasma // Physics of plasmas. 2006. V. 13. P. 123504.
<https://doi.org/10.1063/1.2401155>
- Frank L.A. Plasmas in the Earth's magnetosphere // Space Sci. Rev. 1985. V. 42. P. 211–240.
- Freeman J.W., Ibrahim M. Lunar electric fields, surface potential and associated plasma sheaths // Moon. 1975. V. 8. P. 103–114.
- Goswami J.N., Annadurai M., Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon // Curr. Sci. 2009. V. 96. P. 486–491.
- Gaier J.R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions // NASA TM-2005-213610. 2005.
- Gaier J. Interpretation of the Apollo 14 Thermal Degradation Sample experiment // Icarus. 2012. V. 221(1). P. 167–173.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.002>
- Gaier J.R. The impact of dust on lunar surface equipment during Apollo // LPI Contrib. Nom 2141. Lunar Dust 2020. 5002.pdf.
- Glenar D.A., Stubbs T.J., McCoy J.E., Vondrak R.R. A re-analysis of the Apollo light scattering observations, and implications for lunar exospheric dust // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1695–1707.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.12.003>
- Graff J.C. Lunar soil grain size catalog // NASA-RP-1265. 1993.
- Grannis P.D. Electrostatic erosion mechanisms on the Moon // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 4293–4299.
- Grava C., Stubbs T.J., Glenar D.A., Retherford K.D., Kaufmann D.E. Absence of detectable lunar nanodust exosphere during a search with LRO's LAMP UV imaging spectrometer // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. P. 4591–4598. doi:1002/2017GRL072797.
- Greenberg P.S., Chen D.-R., Smith S.A. Aerosol Measurements of the Fine and Ultrafine Particle Content of Lunar Regolith // NASA/TM-2007-214956. 2007.
- Grun E., Zook H.A., Fechtig H., Giese R.H. Collisional balance of the meteoritic complex // Icarus. 1985. V. 62. P. 244–272.
- Grun E., Horanyi M., Sternovsky Z. The lunar dust environment // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1672–1680.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.04.005>
- Halekas J.S., Mitchell D.L., Lin R.P., Frey S., Hood L.L., Acuña M.H., Binder A.B. Mapping of crustal magnetic anomalies on the lunar near side by the Lunar Prospector electron reflectometer // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. E11. P. 27841–27852.
<https://doi.org/10.1029/2000JE001380>
- Halekas J.S., Delory G.T., Brain D.A., Lin R.P., Fillingim M.O., Lee C.O., Mewaldt R.A., Stubbs T.J., Farrell W.M., Hudson M.K. Extreme lunar surface charging during solar energetic particle events // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L02111.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028517>
- Halekas J.S., Delory G.T., Lin R.P., Stubbs T.J., Farrell W.M. Lunar Prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A09102.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013194>
- Halekas J.S., Delory G.T., Lin R.P., Stubbs T.J., Farrell W.M. Lunar surface charging during solar energetic particle events: measurement and prediction // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A05110.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014113>
- Halekas J.S., Saito Y., Delory G.T., Farrell W.M. New views of the lunar plasma environment // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1681–1694.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.08.011>
- Hapke B., Sato H. The porosity of the upper lunar regolith // Icarus. 2016. V. 273. P. 75–83.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.10.031>
- Hartzell C.M., Scheeres D.J. The role of cohesive forces in particle launching on the Moon and asteroids // Planet.

- and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1758–1768.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.04.017>
- Hayne P.O., Bandfield J.L., Siegler M.A., Vasavada A.R., Ghent R.R., Williams J.-P., Greenhagen B.T., Aharonson O., Elder K.M., Lucey P.G., Paige D.A. Global Regolith Thermophysical Properties of the Moon From the Diviner Lunar Radiometer Experiment // J. Geophys. Res. Planets. 2017. V. 122. P. 2371–2400.
<https://doi.org/10.1002/2017JE005387>
- Hendrix A.R., Retherford K.D., G.R., Gladstone, Hurley D.M., Feldman P.D., Egan A.F., Kaufmann D.E., Miles P.F., Parker J.W., Horvath D., Rojas P.M., Versteeg M.H., Davis M.W., Greathouse T.K., Mukherjee J., Steff A.J., Pryor W.R., Stern S.A. The lunar far-UV albedo: Indicator of hydration and weathering // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. E12001.
<https://doi.org/10.1029/2012JE004252>
- Holmström M., Wieser M., Barabash S., Futaana Y., Bhardwaj A. Dynamics of solar wind protons reflected by the Moon // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A06206.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014843>
- Hood L.L., Zakharian A., Halekas J., Mitchell D.L., Lin R.P., Acuña M.H., Binder A.B. Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data // J. Geophys. Res. 2001. P. 106: 27825–27840.
- Horányi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srama R., Szalay J.R., Wright G. The Lunar Dust Experiment (LDEX) Onboard the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) Mission // Space Sci. Rev. 2014. 185: 93–113.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0118-7>
- Jackson T.L., Farrell W.M., Killen R.M., Delory G.T., Halekas J.S., Stubbs T.J. Discharging of Roving Objects in the Lunar Polar Regions // J. Spacecraft and Rockets. 2011. V. 48. № 4. P. 700–703.
<https://doi.org/10.2514/1.51897>
- Kallio E., Dyadechkin S., Wurcz P., Khodachenko M. Space weathering on the Moon: Farside-nearside solar wind precipitation asymmetry // Planetary and Space Science. 2019. V. 166. P. 9–22.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.07.013>
- Katzan C.M., Edwards J.L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components // NASA Contractor Report 4404. 1991.
- Keller L.P., McKay D.S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith // Science. 1993. V. 261. P. 1305–1307.
- Kuznetsov I.A., Zakharov A.V., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Afonin V.V., Popel S.I., Shashkova I.A., Borisov N.D. Lunar dust: Properties and investigation techniques // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 7. P. 611–622.
<https://doi.org/10.1134/S0038094617070097>
- Lee L.-H. Adhesion and cohesion mechanisms of lunar dust on the moon's surface // J. Adhesion Sci. Technol. 1995. V. 8. P. 1103–1124.
<https://doi.org/10.1163/156856195X00932>
- Leontovich A.K., Gromov V.V., Dmitriev A.D., Lozhkin V.A., et al. Physical and mechanical properties of lunar soil sample in a research chamber in a nitrogen medium // Lunar grunt iz Morya Izobilia (Lunar Soil from the Mare Fecunditatis) / Ed. A.P. Vinogradov. Nauka. 1974. P. 563–570.
- Li Q., Rudolph V., Peukert W. London-van der Waals adhesiveness of rough particles // Powder Technology 161 (2006) 248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.10.012>
- Lin R.P., Mitchell D.L., Curtis D.W., Anderson K.A., Carlson C.W., McFadden J., Acuña M.H., Hood L.L., Binder A. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from Lunar Prospector // Science. 1998. V. 281. P. 1480–1484.
<https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1480>
- Linnarsson D., Carpenter J., Fubini B., Gerde P., Karlsson L.L., Loftus D.J., Prisk G.K., Stauffer U., Tranfield E.M., van Westrenen W. Toxicity of lunar dust // Planet. and Space Sci. 2012. V. 74. P. 57–71.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.023>
- Lisin E.A., Tarakanov V.P., Petrov O.F., Popel' S.I., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Fortov V.E. Effect of the Solar Wind on the Formation of a Photoinduced Dusty Plasma Layer near the Surface of the Moon // JETP Letters. 2013. V. 98. № 11. P. 664–669.
- Lisin E.A., Tarakanov V.P., Popel S.I., Petrov O.F. Lunar dusty plasma: A result of interaction of the solar wind flux and ultraviolet radiation with the lunar surface // J. Physics. Conf. Ser. 2015. V. 653. 012139. 2015.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012139>
- Liu Y., Park J., Schnare D., Hill E., Taylor L.A. Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies. II: Texture and Shape Characteristics // J. Aerospace Engin. 2008. V. 21. № 4.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)08931321\(2008\)21:4\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)08931321(2008)21:4(272))
- Liu Y., Taylor L.A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar stimulants // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1769–1783.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.11.007>
- Loftus D.J., Rask J.C., McCrossin C.G., Tranfield E.M. The Chemical Reactivity of Lunar Dust: From Toxicity to Astrobiology // Earth, Moon and Planets. 2010. V. 107. P. 95–105.
<https://doi.org/10.1007/s11038-010-9376-x>
- Lucke R.L., Henry R.C., Fastie W.G. Far-ultraviolet albedo of the Moon // Astron. J. 1976. V. 81. P. 1162–1169.
<https://doi.org/10.1086/112000>
- Lue C., Halekas J.S., Poppe A.R., McFadden J.P. ARTEMIS observations of solar wind proton scattering off the lunar surface // J. Geophys. Res. Space Phys. 2018. V. 123. P. 5289–5299.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025486>
- Mahmood A., Mitchell J.K., Carrier W.D. III. Grain orientation in lunar soil // Proc. 5th Lunar Sci. Conf. 1974. P. 2347–2354. 1974.
- Manka R.H. Plasma and potential at the lunar surface, in Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space // Photon and particle interactions with surfaces in space / Ed. Garard R.J.L. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. Holland. 1973. P. 347–361.

- McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P., Frisch, Funsten H.O., Gruntman M., Janzen P.H., Kucharek H., Moebius E., P. Reisenfeld D.B., Schwadron N.A. Lunar backscatter and neutralization of the solar wind: First observations of neutral atoms from the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L12104.
<https://doi.org/10.1029/2009GL038794>
- McCoy J.E., Criswell D.R. Evidence for a high latitude distribution of lunar dust // *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 5th, 1974. 2991.
- McKay D.S., Morrison D.A. Lunar breccias // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. № 23. P. 5658–5669.
- McKay D.S., Ming D.W. Properties of lunar regolith // *Development in Soil Science*. 1990. V. 19. P. 449–462.
[https://doi.org/10.1016/S1266-2481\(08\)70360-X](https://doi.org/10.1016/S1266-2481(08)70360-X)
- McKay D.S., Heiken G., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B.M., Papike J. The Lunar Regolith // *The Lunar Sourcebook* / Eds Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 285–356.
- Mishra S.K., Bhardwaj A. Photoelectron Sheath on Lunar Sunlit Regolith and Dust Levitation // *Astrophys. J.* 2019. 884: 5.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e08>
- Mishra S.K. Role of photoelectric charge fluctuation in dust detachment from the lunar surface // *Phys. Plasmas* 2020. V. 27. 052901.
<https://doi.org/10.1063/5.0009741>
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D.E., Starr R., Tretyakov V.I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M.T. Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330. P. 483–486.
- Molaro J.L., Byrne S., Langer S.A. Grain-scale thermoelastic stresses and spatiotemporal temperature gradients on airless bodies, implications for rock breakdown // *J. Geophys. Res. Planets*. 2015. V. 120. P. 255–277.
<https://doi.org/10.1002/2014JE004729>
- Murphy T.W., Jr., Adelberger E.G., Battat J.B.R., Hoyle C.D., McMillan R.J., Michelsen E.L., Samad R.L., Stubbs C.W., Swanson H.E. Long-term degradation of optical devices on the Moon // *Icarus*. 2010. 208. 31–35.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.02.015>
- Nitter T., Havnes O., Melandsø F. Levitation and dynamics of charged dust in the photoelectron sheath above surfaces in space // *J. Geophys. Res.* 1998. 103 (A4), 6605–6620.
<https://doi.org/10.1029/97JA03523>
- O'Brien B.J. Direct active measurements of movements of lunar dust: rocket exhausts and natural effects contaminating and cleaning Apollo hardware on the Moon in 1969 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. 36, L09201.
<https://doi.org/10.1029/2008GL037116>
- O'Brien P.O., Byrne S., Zega T.J. Lunar landscape evolution and space weathering // 50th Lunar Planet. Sci. Conf. 2019. Contr. № 2132. 2003.pdf.
- Opik E.J., Singer S.F. Escape of gases from the Moon // *J. Geophys. Res.* 1960. V. 65. P. 3065.
<https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03065>
- Olhoeft G.R., Frisillo A.L., Strangway D.W., Sharpe H. Temperature dependence of electrical conductivity and lunar temperatures // *Moon*. 1974. V. 9. P. 79–87.
<https://doi.org/10.1007/BF00565394>
- Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The Lunar Regolith Chemistry, Mineralogy, and Petrology // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1982. V. 20. № 4. P. 761–826.
- Park J.S., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A. Micro-morphology and toxicological effect of lunar dust // *Lunar and Planet. Sci.* 2006a. XXXVII. 2193.pdf.
- Park J.S., Liu Y., Kihm K.D., Hill E., Taylor L.A. Submicron particle size distribution of Apollo 11 lunar dust // *Earth and Space. ASCE* 2006b.
- Peterson W.K., Shelley E.G. Origin of the plasma in a crosspolar cap auroral feature (Theta aurora) // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 6729.
- Pieters C.M., Fischer E.M., Rode A. Basu. Optical effects of space weathering: The role of the finest fraction // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № E11. P. 20817–20824.
- Pieters C.M., Noble S.K. Space weathering on airless bodies // *J. Geophys. Res. Planets*. 2016. V. 121. P. 1865–1884.
<https://doi.org/10.1002/2016JE005128>
- Popel S.I., Zelenyi L.M. Dusty plasmas over the moon // *J. Plasma Phys.* 2014. V. 80(6). P. 885–893.
<https://doi.org/10.1017/S0022377814000828>
- Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B. Dusty plasma sheath-like structure in the region of lunar terminator // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. № 12. 123701.
<https://doi.org/10.1063/1.4937368>
- Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu. Lunar dust and dusty plasmas: Resent development, advances, and unsolved problems // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 156. P. 71–84.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.010>
- Poppe A., Horányi M. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A08106. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015286>
- Reasoner D.L., Burke W.J. Measurement of the lunar photoelectron layer in the geomagnetic tail // *Photon and particle interactions with surfaces in space* / Ed. Grard R.J.L. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. Holland: 1973. P. 369–387.
- Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // *Moon*. 1974. V. 10. P. 121–1423.
- Rich F.J., Reasoner D.L., Burke W.J. Plasma sheet at lunar distance: Characteristics and interactions with the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № 34. P. 8097–8112.
<https://doi.org/10.1029/JA078i034p08097>
- Richmond N.C., Hood L.L., Halekas J.S., Mitchell D.L., Lin R.P., Acuña M., Binder A.B. Correlation of a strong

- lunar magnetic anomaly with a high-albedo region of the Descartes mountains // *Geophys Res Lett.* 2003. V. 30. № 7. 1395.
https://doi.org/10.1029/2003GL016938
- Rode O.D., Ivanov A.V. Particle size distribution of regolith samples of LUNA-324 // *Sol. Syst. Res.* 1984. V. 18. P. 1–3.
- Rosenfeld E.V., Korolev A.V., Zakharov A.V. Lunar nanodust: Is it a borderland between powder and gas? // *Adv. Space Res.* 2016. V. 58. P. 560–563.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.022
- Rosenfeld E.V., Zakharov A.V. Dust shedding from a dielectric surface in plasma as a result of charge fluctuations // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25. 103703.
https://doi.org/10.1063/1.5029562
- Rosenfeld E.V., Zakharov A.V. Charge fluctuations on the sunlit surface of airless bodies and their role in dust levitation // *Icarus.* 2020. V. 338. 113538.
https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113538
- Saito Y., Yokota S., Tanaka T., Asamura K., Nishino M. N., Fujimoto M., Tsunakawa H., Shibuya H., Matsushima M., Shimizu H., Takahashi F., Mukai T., Terasawa T. Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA) // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L24205.
https://doi.org/10.1029/2008GL036077
- Schwerer F.C., Huffman G.P., Fisher R.M., Nagata T. Electrical conductivity of lunar surface rocks: laboratory measurements and implications for lunar interior temperatures // *Proc. 5th Lunar Sci. Conf.* 1974. P. 2673–2687.
- Severny A.B., Terez E.I., Zvereva A.M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 // *Moon.* 1975. V. 14. P. 123–128.
- Sheridan T.E., Goree J., Chiu Y.T., Rairden R.L., Kiessling J.A. Observation of dust shedding from material bodies in a plasma // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № A3. P. 2935–2942.
- Sheridan T.E., Hayes A. Charge fluctuations for particles on a surface exposed to plasma // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. 091501.
https://doi.org/10.1063/1.356030
- Sheridan T.E. Charging time for dust grain on surface exposed to plasma // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. 143304.
https://doi.org/10.1063/1.4797481
- Sickafoose A.A., Colwell J.E., Horányi M., Robertson S. Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107 (A11). P. 1–11.
https://doi.org/10.1029/2002JA009347
- Singer S.F., Walker E.H. Electrostatic dust transport on the lunar surface // *Icarus.* 1962. V. 1. № 2. P. 112–120.
- Starukhina L. Water detection on atmosphereless celestial bodies: Alternative explanations of the observations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № E7. P. 14701–14710.
- Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 59–66.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.048
- Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. Impact of dust on lunar exploration // *Dust in Planetary Systems*, SP-643 / Eds Krüger, H., Graps, A.L. ESA Publications. 2007a. P. 239–244.
- Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M., Collier M.R. Prediction of dust concentration in the lunar exosphere // *J. Astronautics.* 2007b. V. 28. № Sup. P. 166–167.
- Stubbs T.J., Glenar D.A., Farrell W.M., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Delory G.T. On the role of dust in the lunar ionosphere // *Planet. Space Sci.* 2011. V. 59 (13). P. 1659–1664.
https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.05.011
- Stubbs T.J., Glenar D.A., Jordan A.P., Wang Y., Vondrak R.R., Collier M.R., Farrell W.M., Zimmerman M.I., Schwadron N.A., Spence, H.E. Interplanetary conditions during the Apollo missions: implications for the state of the lunar environment // *Ann. Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group, LPI Contribution.* 2012. № 1685. P. 3019.
- Stubbs T.J., Farrell W.M., Halekas J.S., Burchill J.K., Collier M.R., Zimmerman M.I., Vondrak R.R., Delory G.T., Pfaff R.F. Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 90. P. 10–27.
https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.07.008
- Tsunakawa H., Takahashi F., Shimizu H., Shibuya H., Matsushima M. Surface vector mapping of magnetic anomalies over the moon using Kaguya and Lunar Prospector observations // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120:1160–1185.
https://doi.org/10.1002/2014JE004785
- Tsurutani B.T., Jones D.E., Sibeck D.G. The two-lobed structure of the distant (X > 200 RE) magnetotail // *Geophys. Res. Lett.* 1984a. V. 11. P. 1066.
- Tsurutani B.T., Jones D.E., Slavin J.A., Sibeck D.G., Smith E.J. Plasma sheet magnetic fields in the distant tail // *Geophys. Res. Lett.* 1984a. V. 11. P. 1062.
- Vaniman D., Reedy R., Heiken G., Olhoeft G., Mendell W. The Lunar environment // *Lunar Sourcebook* / Ed. Heiken, G.H., Vaniman, D.T., French, B.M. Cambridge Univ. Press. 1991. P. 27. http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/
- Vanoman D., Reedy R., Heiken G., Olhoeft G., Mendel W. The lunar environment // *Lunar Sourcebook* / Ed. Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 27–60.
- Vaverka J., Richterová I., Pavlu J., Šafránková J., Němeček Z. Lunar surface and dust grain potentials during the Earth's magnetosphere crossing // *Astrophys. J.* 2016. 825:133 (10 pp).
https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/133
- Wang X., Horanyi M., Robertson S. Experiments on dust transport in plasma to investigate the origin of the lunar horizon glow // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A05103.
https://doi.org/10.1029/2008JA013983
- Wieser M., Barabash S., Futaana Y., Holmström M., Bhardwaj A., Sridharan R., Dhanya M.B., Wurß P., Schaufelberger A., Asamura K. Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith

- in space // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. P. 14–15.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.09.012>
- Whipple E.C.* Potentials of surfaces in space // *Rep. Prog. Phys.* 1981. V. 44. P. 1197–1250.
- Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B.* Photo-emission and secondary electron emission from lunar surface material // *Photon and particle interactions with surfaces in space* / Ed. Grard R.J.L., D. Reidel Puftayblishing Co., Dordrecht, Holland. 1973. P. 389–401.
- Wooden D.H., Cook A.M., Colaprete A., Glenar D.A., Stubbs T.J., Shirley M.* Evidence for a dynamic nanodust cloud enveloping the Moon // *Nature Geoscience Letters*. 2016. 9, 665–668.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2779>
- Wurz P., Rohner U., Whitby J.A., Kolb C., Lammer H., Dobnikar P., Martín-Fernández J.A.* The lunar exosphere: The sputtering contribution // *Icarus*. 2007. V. 191. P. 486–496.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.04.034>
- Zelenyi L.M.* Milestones of the Russian space program for the decade 2016-2025 // *The Seventh Moscow Solar System Symp., (7M-S3). Abstracts of Papers.* Moscow. 2016.
- Zimmerman M.I., Jackson T.L., Farrell W.M., Stubbs T.J.* Plasma wake simulations and object charging in a shadowed lunar crater during a solar storm // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00K03.
<https://doi.org/10.1029/2012JE004094>
- Zook H.A.* The state of meteoritic matter on the moon // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th. 1975. P. 1653–1672.
- Zook H.A., McCoy J.E.* Large-scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 2117–2120.
- Zook H.A., Potter A.E., Cooper B.L.* The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow // *Lunar and Planet. Sci.* 1995. V. 26. P. 1577–1578.