

Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны

С. И. Попель^{+*×1)}, А. П. Голубь⁺, Л. М. Зеленый^{+*×}, М. Хорáньи^{°2)}

⁺Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

*Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Россия

[×]Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Москва, Россия

[°]Университет штата Колорадо, 80303 Боулдер, США

Поступила в редакцию 5 апреля 2017 г.

Обсуждается возможность образования плазменно-пылевого облака в экзосфере Луны вследствие ударов метеороидов о ее поверхность. Основное внимание уделяется пылевым частицам на больших высотах ~ 10 – 100 км над лунной поверхностью, на которых проводились измерения в рамках миссии NASA LADEE. Показано, что важную роль при образовании пылевого облака играет расплавленное вещество, выбрасываемое с поверхности Луны в результате ударов метеороидов. Капли расплавленного вещества приобретают скорости, лежащие в диапазоне между первой и второй космическими скоростями для Луны, и могут совершать финитное движение вокруг нее. При подъеме над лунной поверхностью жидкие капли затвердевают и приобретают электрические заряды, в частности, за счет их взаимодействия с электронами и ионами солнечного ветра, а также с солнечным излучением. Показано, что концентрация пылевых частиц в плазменно-пылевом облаке, присутствующем в экзосфере Луны, составляет $\lesssim 10^{-8}$ см $^{-3}$, что находится в соответствии с данными измерений, проведенных LADEE.

DOI: 10.7868/S0370274X17100034

Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы (см., например, [1–10]). Первые указания о присутствии пыли в приповерхностном слое над Луной были получены автоматическими спускаемыми космическими аппаратами Surveyor, которые с помощью телевизионной камеры получили изображения лунного горизонта после заката Солнца. Эти изображения обнаруживают приповерхностное (с характерными высотами ~ 10 – 30 см) свечение над областью лунного терминатора [11]. Объяснение этого эффекта обычно связывают [12, 13] с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах. В рамках миссий Apollo наблюдали пыль с размерами ~ 100 нм в экзосфере Луны вплоть до высот порядка 100 км.

Сходные заключения можно сделать на основе результатов наблюдений недавней (сентябрь 2013 г. – апрель 2014 г.) американской миссии LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”)

[14, 15], согласно которым вокруг Луны вплоть до высот, по крайней мере, порядка нескольких сот километров присутствует непрерывно существующее облако субмикронной пыли.

Измерения характеристик пыли проводились в рамках миссии LADEE, в частности, с помощью ударного ионизационного датчика пыли LDEX, позволяющего напрямую детектировать пылевые частицы на орбите космического аппарата. Научная цель экспериментов состояла в определении распределений пылевых частиц по высотам, размерам и концентрациям над различными участками лунной поверхности. Установка LDEX позволяла фиксировать индивидуальные пылевые частицы с радиусами, большими 0.3 мкм, и измерять кумулятивный заряд от нескольких более мелких частиц (от 0.1 мкм до 0.3 мкм).

С помощью LDEX удалось определить среднюю скорость соударений пылевых частиц с прибором, составляющую приблизительно 1 и 0.1 ударов в минуту для частиц с зарядами $q > 0.5$ фКл и $q > 5$ фКл, которые соответствуют размерам частиц $a > 0.3$ мкм и $a > 0.7$ мкм. Измерения, выполненные с помощью установки LDEX, обнаруживают присутствие разреженного, но устойчиво существующего облака

¹⁾e-mail: popel@iki.rssi.ru

²⁾M. Horányi.

небольших пылевых частиц с радиусами от < 0.3 мкм до > 0.7 мкм. На рис. 1 представлены концентрации

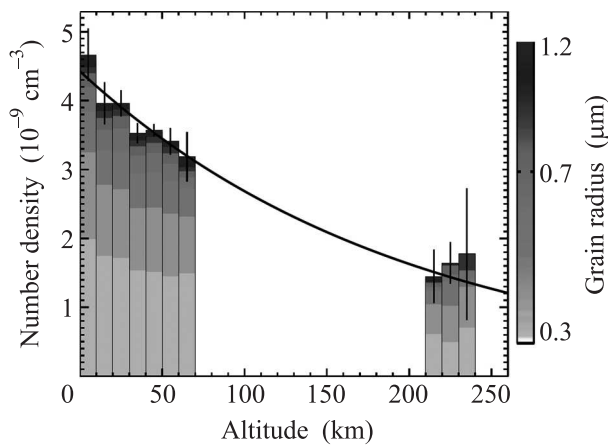


Рис. 1. Концентрации пылевых частиц различных размеров на разных высотах от поверхности Луны

пылевых частиц различных размеров на разных высотах от поверхности Луны. Оказывается возможным привести эмпирическое соотношение, характеризующее зависимость концентрации пылевых частиц от высоты и описывающее сплошную линию, проходящую через верхи столбиков концентрации на рис. 1: $n_d = 4.43 \exp(-h/200) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$, где высота h измеряется в км. В целом, наблюдаемая в рамках миссии LADEE концентрация пылевых частиц в облаке находится в диапазоне $(0.4-4) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$. Измерения не позволили обнаружить ожидаемого в рамках динамической “фонтанной” модели для лунной пыли (a dynamic fountain model for lunar dust) [1] увеличения концентрации пыли над областью терминатора за счет электростатических процессов. Однако было обнаружено скачкообразное возрастание концентрации пыли во время взаимодействия некоторых из ежегодных метеорных потоков с Луной. Особенно данный эффект проявлялся во время высокоскоростного метеорного потока Геминиды. Все это указывает на связь между процессами формирования пылевого облака и соударениями метеороидов с поверхностью Луны.

Имеется также ряд косвенных свидетельств о существовании лунного плазменно-пылевого облака. Например, в рамках советских экспедиций “Луна-19” и “Луна-22” для определения концентрации электронов над Луной проводились радиозатменные измерения [16, 17]. На основе этих измерений оказалось возможным сделать вывод о существовании над освещенной солнечным излучением стороной Луны “лунной ионосферы” с пиковой концентрацией электронов $n_e \sim 500-1000 \text{ см}^{-3}$ и характерным высотным мас-

штабом $\sim 10-30$ км. Эти значения согласуются с данными, полученными на основе радиозатменных измерений Крабовидной туманности в ситуации наблюдения преломления радиоволн в окрестности Луны [18, 19]. Столь высокие концентрации электронов могут быть обусловлены присутствующими на больших высотах над Луной заряженными пылевыми частицами [3].

В данной работе рассмотрена возможность образования плазменно-пылевого облака на больших высотах ($\sim 10-100$ км) над Луной вследствие ударов метеороидов с ее поверхностью. Удары метеороидов могут приводить к подъему пылевых частиц, в том числе, и на большие высоты. Концентрация пылевых частиц на этих высотах определяется потоком частиц, поднимающихся над лунной поверхностью и образующихся в результате ударов метеороидов, который, в свою очередь, связан с количеством столкновений метеороидов с поверхностью Луны.

Количество ударов метеороидов о лунную поверхность определяется значениями их потока. Здесь используют зависимости $F_i(m_i)$ [20], характеризующие плотность потока метеороидов с массами, превосходящими m_i , в околоземном космическом пространстве (аналогичную плотности потока метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью) и подходы, аналогичные разработанным в [10]. Согласно результатам этой работы количество соударений метеороидов с единицей площади лунной поверхности в единицу времени по порядку величины равно $N_i \approx 100 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Большинство ударников имеют субмикронный и микрометровый размер. Значение средней скорости ударников приблизительно равно $\langle u_i \rangle \approx 27 \text{ км/с}$.

Рассмотрим соударение высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью в предположении, что удельная энергия ударника $u_i^2/2$ значительно превосходит энергию связи атомов и молекул в ударнике и лунном реголите, который состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стекла, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т.д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами оплавления и спекания.

Предположение о том, что энергия связи атомов и молекул в ударнике и лунном реголите пренебрежимо мала по сравнению с удельной энергией ударника, оправдано, поскольку энергия связи обычно имеет порядок 10 МДж/кг , тогда как удельная энергия ударника $u_i^2/2 \sim \langle u_i \rangle^2/2 \approx 360 \text{ МДж/кг}$. При соударении высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью происходит сильное сжатие и нагрев

вещества ударника и мишени. В результате воздействия высокого давления образуется сильная ударная волна, распространяющаяся (и ослабевающая при движении) от эпицентра удара. В конечном итоге, ослабевшая ударная волна трансформируется в линейную звуковую волну.

Вычисления проводят для ситуации, когда ударник состоит из сплошного габброидного анортозита, тогда как веществом мишени является пористый габброидный анортозит. Предполагается, что плотности ударника и мишени до соударения соответственно равны $\rho_{i0} = 3 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{t0} = 1.4 \text{ г/см}^3$. Пористость мишени $k = \rho_{i0}/\rho_{t0} = 2.14$. Также предполагается линейная зависимость между скоростью сильной ударной волны $D_{i,t}$ и массовой скоростью u за ударно-волновым фронтом: $D_{i,t} = C_{i,t} + S_{i,t}u$. Здесь индексы i, t характеризуют вещество соответственно ударника и мишени, $C_i = 7.71 \text{ км/с}$, $S_i = 1.05$, $C_t = C_i k / (1 + S_i(k - 1)) = 7.51 \text{ км/с}$, $S_t = S_i k / (1 + S_i(k - 1)) = 1.02$. Скорость ударной волны и массовая скорость однозначно определяют уравнение состояния через хорошо известные уравнения Гюгонно. Линейная зависимость между указанными скоростями обычно достаточно хорошо описывает экспериментальные данные (см. [21]).

На рис. 2 представлены зависимости от скорости ударника u_i максимальной массовой скорости u_{\max} и максимального давления p_{\max} за фронтами ударных волн в ударнике и мишени, степени сжатия веществ мишени $\delta_{t,\max} \equiv \rho_{t,\max}/\rho_{t0}$ и ударника $\delta_{i,\max} \equiv \rho_{i,\max}/\rho_{i0}$ (где $\rho_{t(i),\max}$ – максимальная плотность вещества за ударно-волновым фронтом), а также максимальной внутренней энергии веществ мишени $e_{t,\max}$ и ударника $e_{i,\max}$.

В результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва, расположенного на глубине W_0 под поверхностью, формируются зоны (ср. с [10]), характеризующие происходящие при этом процессы: зона испарения вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), а также зона нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), характеризуемая значениями давления в нелинейной звуковой волне, меньшими динамического предела упругости (рис. 3). За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная. Полагая скорость звука в невозмущенном реголите равной $c_0 = 300 \text{ м/с}$, а плотность верхнего слоя реголита – $\rho_{t0} \approx 1.4 \text{ г/см}^3$, и анализируя распространение ударной волны, мож-

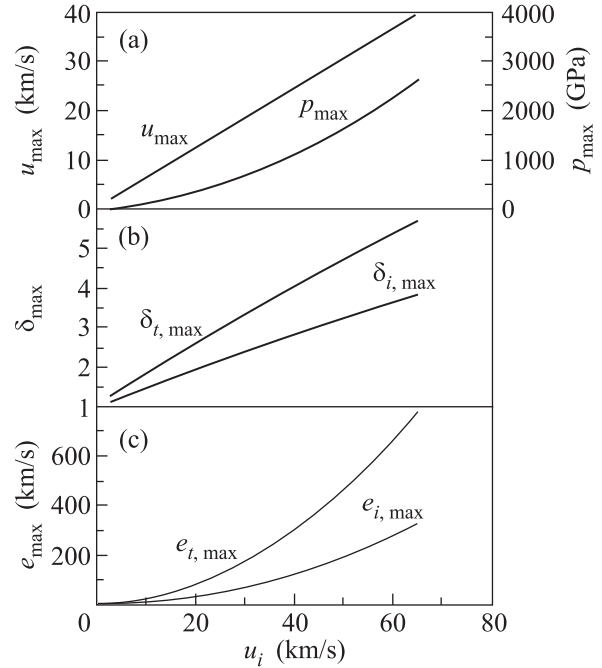


Рис. 2. Зависимости от скорости ударника u_i максимальной массовой скорости u_{\max} и максимального давления p_{\max} за фронтами ударных волн в ударнике и мишени (а), степени сжатия веществ мишени $\delta_{t,\max} \equiv \rho_{t,\max}/\rho_{t0}$ и ударника $\delta_{i,\max} \equiv \rho_{i,\max}/\rho_{i0}$ (б), максимальной внутренней энергии веществ мишени $e_{t,\max}$ и ударника $e_{i,\max}$ (с)

но определить радиусы внешних границ I, II, III и IV зон под лунной поверхностью: $r_I \approx 0.31u_i^{2/3}a_i$, $r_{II} \approx 0.58u_i^{2/3}a_i$, $r_{III} \approx 0.93u_i^{2/3}a_i$, $r_{IV} \approx 1.3u_i^{2/3}a_i$, где a_i – радиус ударника, а скорость u_i вычисляется в км/с.

Следуя работе [22], оценим глубину откольного слоя, т.е. слоя, в котором фрагменты с поверхности лунной породы отделяются в результате взаимодействия с волной сжатия. В зоне линейных упругих деформаций вещества реголита (V) выражение для глубины откольного слоя имеет вид [10]:

$$w = 0.5c_0\tau_+, \quad \text{если } r > r_{IV}, \quad (1)$$

где τ_+ – время положительной фазы ($u_r > 0$) в ударной волне, u_r – горизонтальная компонента массовой скорости в ударной волне. Для нахождения глубины откольного слоя в зонах I–IV используем линейную интерполяцию:

$$w(r) = W_0 + \frac{w_c - W_0}{r_{IV}}r, \quad \text{если } r \leq r_{IV}, \quad (2)$$

где

$$W_0 = \frac{2a_i\rho_{i0} \cos \theta}{\rho_{t0}} \quad (3)$$

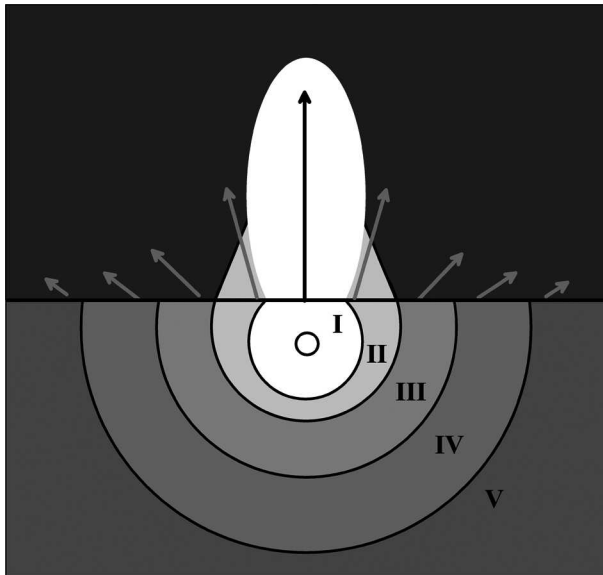


Рис. 3. Схема, характеризующая формирование под лунной поверхностью зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), зоны нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), зоны линейных упругих деформаций вещества реголита (V). Круг в зоне (I) представляет невозмущенный метеороид, расположенный в эквивалентном центре метеороидного взрыва. Стрелки характеризуют выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны из зон I-V. Теми же цветами, что и соответствующие зоны показаны выбросы вверх испаренного и расплавленного вещества

– глубина эквивалентного центра метеороидного взрыва, θ – угол падения метеороида (между направлениями падения метеороида и вертикалью к лунной поверхности).

Отметим также, что при распространении ударной волны вдоль лунной поверхности вдали от эпицентра метеороидного удара в приповерхностном слое формируется волна разрежения и появляется вертикальная компонента u_z массовой скорости за фронтом ударной волны. В дальнейших вычислениях полагаем $u_r \sim u_z$. В частности, при $r > r_{IV}$ имеем $u_r = (1 - 1.5)u_z$ [22]. Исходя из выражений для глубины откольного слоя w и среднего потока метеороидов на поверхности Луны, можно найти количество пылевых частиц N , поднимающихся в единицу времени над единицей площади лунной поверхности вследствие ударов метеороидов.

На основе вычислений скорости и количества вещества, поднимающегося над поверхностью Луны и

происходящего из различных зон, удается сформулировать следующие выводы:

(1) масса пылевых частиц, происходящих из зоны V линейных упругих деформаций вещества реголита и поднимающихся над поверхностью Луны на высоты, большие 10 м (1 км), в 80 раз (6 раз) превосходит массу поднимающегося вещества, происходящего из других зон (I–IV);

(2) масса пылевых частиц, происходящих из зон IV и V упругих деформаций и поднимающихся над поверхностью Луны на высоты, большие 10 км, в 4 раза превосходит массу поднимающегося вещества, происходящего из зон I–III;

(3) только материал из зон испарения вещества (I), плавления вещества (II), а также зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III) может достигнуть высоты 100 км над поверхностью Луны и выше;

(4) высота 700 км достигается только материалом, выбрасываемым ударной волной из зоны испарения вещества (I) и плавления вещества (II).

Кроме того, наиболее важной зоной с точки зрения образования пылевого облака над поверхностью Луны является зона плавления вещества (II). Действительно, на границе между зонами II и III скорость выброса вещества определяется соотношением $u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx 1.5$ км/с, тогда как на границе между зонами I и II скорость выброса вещества $u_v = \sqrt{2E_{cv}} \approx 6$ км/с. Здесь $E_{cmt} \approx 1.1$ МДж/кг – удельная пороговая внутренняя энергия полного плавления сплошного габброидного анортозита, $E_{cv} \approx 18$ МДж/кг – удельная пороговая внутренняя энергия полного испарения (в условиях быстрой адиабатической механической разгрузки). Таким образом, только капли, образующиеся в зоне плавления вещества (II), обладают скоростями в диапазоне от первой до второй космической скорости (для Луны), т.е. от 1.68 до 2.38 км/с. Только такие капли могут совершать финитное движение вокруг Луны. Ниже проводится оценка размеров этих капель.

В результате метеороидного удара первоначально пористый реголит сжимается образующейся ударной волной до плотностей сплошного вещества и приобретает форму сферической оболочки, движущейся за ударной волной от эквивалентного центра метеороидного взрыва. Если при выходе ударной волны на свободную поверхность давление за фронтом волны оказывается большим порогового давления полного плавления, но при этом меньшим порогового давления полного испарения, то в результате разлета и быстрой механической разгрузки ударно сжатый материал оказывается полностью расплавленным (зона

II). После выхода ударной волны на свободную поверхность оболочка выбрасывается в свободное пространство находящимся позади нее расширяющимся паром. Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты. Равновесные капли образуются, когда в капельно-паровом потоке объем, занимаемый паром, становится сопоставимым с объемом жидкости. Согласно [23] равновесное значение радиуса капли (при $t \rightarrow \infty$), образованной (вследствие удара метеороида) в зоне плавления вещества (II), имеет вид

$$r_\infty = a_d = \left(\frac{15 \sigma C_D}{4 \rho_d a} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой капли (для силикатных частиц обычно $\sigma \sim \sim 0.3 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}$), C_D – коэффициент сопротивления при движении капли в паровом потоке, ρ_d – плотность вещества капли, a – модуль вектора ускорения,

$$\mathbf{a} = -\frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (5)$$

ρ – плотность капельно-паровой смеси, ∇P – градиент давления P .

Вычисляя градиент давления для параметров ударной волны, образованной в результате удара высокоскоростного метеороида, полагая $C_D = 1$ (см. [23]), $\rho_d = 3 \text{ г}/\text{см}^3$, $\sigma = 0.3 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}$, а также учитывая, что большинство из капель расплава поднимаются из части зоны II, близкой к внешней границе этой зоны, находим характерный радиус капли:

$$a_d \approx 1.5 \cdot 10^{-4} a_i^{1/2}, \quad (6)$$

где a_d и a_i вычисляются в сантиметрах.

Масса вещества, поднимающегося над Луной из зоны плавления II, определяется соотношением:

$$M_{II} = 2\pi\rho_{t0} \int_{r_1}^{r_{II}} w(r)rdr \approx 0.05E_i, \quad (7)$$

где E_i – кинетическая энергия ударника, представленная в кДж, тогда как M_{II} вычисляется в граммах.

Таким образом, количество капель, имеющих происхождение в области плавления вещества (II) и поднимающихся над лунной поверхностью, приблизительно равно:

$$N_{II} = \frac{M_{II}}{m_d} \approx 0.56 \cdot 10^9 \frac{E_i}{a_i^{3/2}}. \quad (8)$$

Здесь $m_d = (4\pi/3)a_d^3\rho_d$ – масса капли.

Введем величину $N(h)$, характеризующую число капель, образованных в результате индивидуально-го удара метеороида о поверхность Луны и достигающих высоты h ($N(h) \sim N_{II}$ на больших высотах, например, порядка 100 км). Эта величина зависит от E_i и a_i . Усредняя $N(h)$ по всем ударам метеороидов в единице площади лунной поверхности в единицу времени (с использованием функций распределения [20], характеризующих удары метеороидов), можно определить поток F_d капель на больших высотах. В табл. 1 представлены результаты вычислений вклада в поток F_d , вносимого каплями различных размеров.

Таблица 1. Потоки $F_d(a_{d \min}, a_{d \max})$ капель с размерами в диапазонах $a_{d \min} \leq a_d \leq a_{d \max}$

$a_{d \min}$ (нм)	$a_{d \max}$ (нм)	$F_d(a_{d \min}, a_{d \max})$ ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)
30	100	0.27
100	300	0.06
300	1000	0.002

Используя данные из табл. 1, а также характерное значение скорости капель $v_d \geq u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx \approx 1.5 \text{ км}/\text{с}$, оценим концентрацию капель с размерами $300 \text{ нм} \leq a_d \leq 1 \text{ мкм}$ на больших высотах над лунной поверхностью: $n_d \lesssim 10^{-8} \text{ см}^{-3}$. Данный результат соответствует наблюдаемой в рамках миссии LADEE концентрации пылевых частиц в облаке, которая находится в диапазоне $(0.4-4) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$.

Итак, рассмотрена возможность образования пылевого облака на больших высотах ($\sim 10-100 \text{ км}$) над Луной вследствие ударов метеороидов о лунную поверхность. Наиболее важной зоной с точки зрения образования пылевого облака на больших высотах над Луной является зона плавления вещества. Только капли вещества из этой зоны приобретают скорости между первой и второй космической скоростью для Луны, т.е. между $1.68 \text{ км}/\text{с}$ и $2.38 \text{ км}/\text{с}$. Только такие капли могут совершать финитное движение вокруг Луны. Материал из зоны плавления вещества выбрасывается в виде расплавленных капель на высоты порядка 100 км и выше. Поскольку поток метеороидов (в том числе и микрометеороидов) на лунную поверхность присутствует всегда, пылевое облако над Луной существует непрерывно. Тот факт, что пылевое облако образует вещество, поднятое с поверхности Луны вследствие ударов метеороидов, объясняет скачкообразное возрастание концентрации пыли во время взаимодействия некоторых из ежегодных метеорных потоков с Луной, в частности, во время высокоскоростного метеорного потока Геминиды. Поднимаясь над поверхностью Луны, жидкие капли расплава затвердевают и в результате

взаимодействия, в частности, с электронами и ионами солнечного ветра, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды. Например, если капля находится над темной стороной Луны, для оценки ее заряда q_d можно использовать зондовую модель: $q_d \sim a_d T_e / e$, где T_e – температура электронов солнечного ветра, e – заряд электрона. При $a_d = 5$ мкм, $T_e = 1.4 \cdot 10^5$ К имеем $q_d \sim 5$ фКл.

Таким образом, в лунной экзосфере существует плазменно-пылевое облако с характерной концентрацией $n_d \lesssim 10^{-8}$ см $^{-3}$ пылевых частиц с размерами 300 нм $\leq a_d \leq 1$ мкм, что соответствует данным измерений, выполненным в рамках миссии LADEE.

Частично работа выполнена при поддержке РФФИ (проект #15-02-05627) и Программы #7 фундаментальных исследований Президиума РАН “Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные взрывные процессы в астрофизике”.

1. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, *Adv. Space Res.* **37**, 59 (2006).
2. Z. Sternovsky, P. Chamberlin, M. Horányi, S. Robertson, and X. Wang, *J. Geophys. Res.* **113**, A10104 (2008).
3. T. J. Stubbs, D. A. Glenar, W. M. Farrell, R. R. Vondrak, M. R. Collier, J. S. Halekas, and G. T. Delory, *Planet. Space. Sci.* **59**, 1659 (2011).
4. А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Ю. Н. Извекова, С. И. Кошнин, С. И. Попель, *Письма в ЖЭТФ* **95**, 198 (2012).
5. С. И. Попель, С. И. Кошнин, А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Ю. Н. Извекова, *Астрономический вестник* **47**, 455 (2013).
6. Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, В. Е. Фортов, *Письма в ЖЭТФ* **98**, 755 (2013).
7. С. И. Попель, А. П. Голубь, Ю. Н. Извекова, В. В. Афонин, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Е. А. Лисин, О. Ф. Петров, *Письма в ЖЭТФ* **99**, 131 (2014).
8. Т. М. Буринская, *Физика плазмы* **40**, 17 (2014).
9. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and B. Atamaniuk, *Phys. Plasmas* **22**, 123701 (2015).
10. С. И. Попель, А. П. Голубь, Е. А. Лисин, Ю. Н. Извекова, Б. Атаманюк, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, *Письма в ЖЭТФ* **103**, 641 (2016).
11. R. H. Norton, J. E. Guinn, W. C. Livingston, G. A. Newkirk, and H. Zirin, *J. Geophys. Res.* **72**, 815 (1967).
12. J. J. Rennilson and D. R. Criswell, *The Moon* **10**, 121 (1974).
13. H. A. Zook and J. E. McCoy, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 2117 (1991).
14. M. Horányi, Z. Sternovsky, M. Lankton, C. Dumont, S. Gagnard, D. Gathright, E. Grün, D. Hansen, D. James, S. Kempf, B. Lamprecht, R. Srama, J. R. Szalay, and G. Wright, *Space Sci. Rev.* **185**, 93 (2014).
15. M. Horányi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grün, R. Srama, and Z. Sternovsky, *Nature* **522**, 324 (2015).
16. М. Б. Васильев, В. А. Виноградов, А. С. Вышлов, О. Г. Ивановский, М. А. Колосов, В. А. Савич, В. А. Самовол, Л. Н. Самознаев, А. И. Сидоренко, А. И. Шейхет, Д. Я. Штерн, *Космические исследования* **12**, 115 (1974).
17. A. S. Vyshlov and M. J. Mycroft, in *Space Research, COSPAR, Paris* (1975), v. 16, p. 945.
18. В. Elsmore, *Phil. Mag. Ser. 8* **2**, 1040 (1957).
19. А. С. Вышлов, Н. А. Савич, *Космические исследования* **16**, 551 (1978).
20. G. Drolshagen, V. Dikarev, M. Landgraf, H. Krag, and W. Kuiper, *Earth Moon Planet* **102**, 191 (2008).
21. Г. Мелощ, *Образование ударных кратеров*, Мир, М. (1994).
22. В. В. Адушкин, А. А. Спивак, *Подземные взрывы*, Наука, М. (2007).
23. H. J. Melosh and A. M. Vickery, *Nature* **350**, 494 (1991).