

## Удары высокоскоростных метеороидов и отрыв пылевых частиц от поверхности Луны

С. И. Попель<sup>+\*1)</sup>, А. П. Голубь<sup>+</sup>, Е. А. Лисин<sup>×</sup>, Ю. Н. Извекова<sup>+\*</sup>, Б. Атаманюк<sup>°</sup>, Г. Г. Дольников<sup>+</sup>,  
А. В. Захаров<sup>+</sup>, Л. М. Зеленый<sup>+\*</sup>

<sup>+</sup>Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

<sup>\*</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Россия

<sup>×</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

<sup>°</sup>Центр космических исследований ПАН, 00-716 Варшава, Польша

Поступила в редакцию 1 апреля 2016 г.

Обсуждается возможность отрыва пылевых частиц вследствие ударов микрометеороидов о поверхность Луны. Показано, что данный эффект играет существенную роль и должен быть учтен при определении количества частиц, поднимающихся над поверхностью Луны при формировании плазменно-пылевой системы. Для различных высот над Луной найдены значения среднего числа частиц реголита, покидающих лунную поверхность вследствие ударов высокоскоростных метеороидов. Определена функция распределения по размерам частиц, покидающих поверхность Луны в результате ударов метеороидов. Показано, что удары метеороидов представляют собой важный источник микрометровых пылевых частиц в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны.

DOI: 10.7868/S0370274X16090022

Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы (см., например, [1–9]). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Первые указания о присутствии пыли в приповерхностном слое над Луной были получены авто-

матическими 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 [10]. Объяснение этого эффекта обычно связывают [11, 12] с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах. В миссиях “Аполлон” и недавней американской миссии “LADEE” (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”) [13] субмикронная пыль наблюдалась над поверхностью Луны вплоть до высот около 100 км. О присутствии пыли в лунной экзосфере косвенно свидетельствуют данные советских экспедиций “Луна-19” и “Луна-22” по определению концентрации электронов над Луной посредством метода радиозатменных измерений [3]. В настоящее время немаловажная роль в космических исследованиях принадлежит выявлению свойств и проявлений пыли у поверхности Луны и в лунной экзосфере. В России готовятся миссии “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс”. На посадочных модулях станций “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс” предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредствен-

<sup>1)</sup>e-mail: popel@iki.rssi.ru

но детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения [14].

Несмотря на значительные достижения последних лет в исследовании плазменно-пылевой системы над Луной, проясняющие ее основные свойства, в настоящее время открытыми остаются вопросы, касающиеся отрыва пылевых частиц от поверхности Луны. В частности, не до конца ясна роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности [15]. В целом, при отрыве пылевых частиц от поверхности Луны существенное значение имеет механическое воздействие на частицы [4]. Такое механическое воздействие может быть обусловлено, в частности, ударами высокоскоростных метеороидов о поверхность Луны. Таким образом, исследование роли метеороидов при отрыве пылевых частиц от поверхности Луны представляет существенный интерес как с научной, так и с технологической точки зрения, например, для устанавливаемой на лунных станциях аппаратуры. В настоящей работе обсуждается возможность отрыва пылевых частиц вследствие ударов микрометеороидов о поверхность Луны и их влияние на формирование плазменно-пылевой системы.

Количество ударов метеороидов о лунную поверхность определяется значениями их потока. Здесь используются зависимости  $F_i(m_i)$  [16], характеризующие плотность потока метеороидов с массами, превосходящими  $m_i$ , в околоземном космическом пространстве (аналогичную плотности потока метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью). Представим функцию распределения ударников по массам и скоростям в виде произведения функций  $f_m(m_i)$  и  $f_u(u_i)$ , зависящих, соответственно, только от массы  $m_i$  и скорости  $u_i$  метеороида. В этом приближении имеем:

$$F_i(m_i) = \int_{m_i}^{+\infty} f_m(m) dm \int_0^{+\infty} u f_u(u) du, \quad (1)$$

где  $f_u(u_i)$  – нормированная функция распределения по скоростям,

$$\int_0^{+\infty} f_u(u) du = 1, \quad (2)$$

а  $f_m(m_i) dm_i$  дает значение концентрации ударников с массами в диапазоне от  $m_i$  до  $m_i + dm_i$ . Средняя скорость ударников определяется следующим образом:

$$\langle u_i \rangle = \int_0^{+\infty} u f_u(u) du. \quad (3)$$

Функция распределения ударников по скоростям  $f_u(u_i)$  имеет три локальных максимума (при  $u_i \approx 18, 50, 63$  км/с (см. рис. 1)). Средняя скорость приблизи-

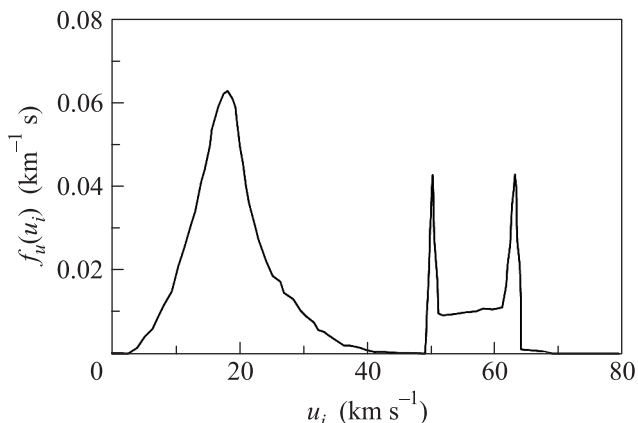


Рис. 1. Функция распределения по скоростям метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью

тельно равна  $\langle u_i \rangle \approx 27$  км/с. Количество соударений метеороидов с единицей площади лунной поверхности в единицу времени по порядку величины равно  $N_i \approx 100 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ . Большинство ударников имеют субмикронный и микрометровый размер.

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. Данное предположение оправдано, поскольку энергия связи обычно имеет порядок 10 МДж/кг, тогда как удельная энергия ударника  $u_i^2/2 \sim \langle u_i \rangle^2/2 \approx 360$  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. На рис. 2 представлены зоны, формируемые вокруг эпицентра удара при распространении ударной волны и характеризующие происходящие при этом процессы: зона испарения вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения частиц, составляющих лунный реголит (III), зона необратимых деформаций частиц (IV), а также зона упругих деформаций (V), формируемая за зоной IV и характеризующаяся значениями давления в звуковой волне, меньшими динамического предела упругости. Полагая скорость звука в невозмущенном реголите равной  $c_0 = 300$  м/с, а плотность верхнего

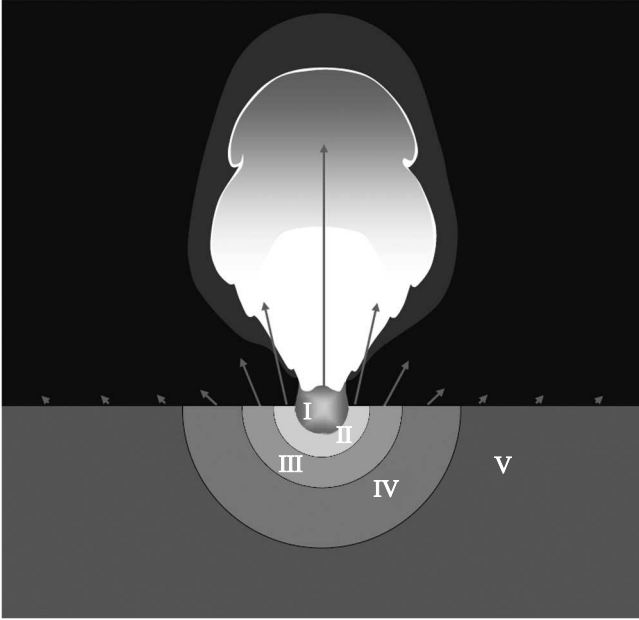


Рис. 2. Схема, характеризующая формирование на лунной поверхности вокруг эпицентра удара метеороида зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения частиц лунного реголита (III), зоны необратимых деформаций частиц (IV), зоны упругих деформаций вещества реголита (V). Стрелки характеризуют выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны из зон I-V

слоя реголита –  $\rho_0 \approx 1.4 \text{ г/см}^3$ , и анализируя распространение ударной волны, можно определить радиусы I, II и IV зон:  $r_I \approx 0.24u_i^{2/3}a_i$ ,  $r_{II} \approx 0.45u_i^{2/3}a_i$ ,  $r_{IV} \approx 1.3u_i^{2/3}a_i$ , где  $a_i$  – радиус ударника, а скорость  $u_i$  вычисляется в км/с. Максимальное давление  $p_m$  в звуковой волне на расстоянии  $r_{IV}$  от эпицентра приблизительно равно:

$$p_m(r_{IV}) = \rho_0 c_0^2 \approx 0.13 \text{ ГПа.} \quad (4)$$

Лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стекол, литифицированных брекчий, фрагментов метеороидов и т.д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами оплавления и спекания. Распределение по размерам частиц, составляющих лунный реголит, хорошо описывается [4] формулой Колмогорова, характеризующей материалы, сформированные в результате многократного дробления породы:

$$\Phi_K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \quad (5)$$

где  $t = (\ln a - \ln(a_K))/\sigma_K$ ,  $a$  – характерный размер частицы,  $a_K = 61.56 \text{ мкм}$ ,  $\sigma_K = 1.29$ .  $\Phi_K(t)$  – вероятность обнаружить частицу лунного реголита с радиусом (характерным размером), меньшим  $a$ .

Введем нормированное распределение по размерам  $\phi_0(a)$  частиц в приповерхностном слое лунного реголита:

$$\phi_0(a) = \frac{d\Phi_K}{dt} \frac{dt}{da} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_K a} \exp\left(-\frac{(\ln a - \ln(a_K))^2}{2\sigma_K^2}\right) dy, \quad (6)$$

$$\int_0^\infty \phi_0(a) da = 1. \quad (7)$$

Для определения предела прочности реголита на растяжение

$$\sigma_{adh} = 2n_0 \int_0^\infty F_{adh} a \phi_0(a) da \quad (8)$$

необходимо знать наряду с распределением  $\phi_0(a)$  также силу адгезии  $F_{adh}$ . Здесь  $n_0$  – концентрация частиц в лунном реголите.

В работе [15] адгезия в лунном реголите рассматривалась только для случая сферических частиц, обладающих гладкими поверхностями. При этом были получены завышенные значения силы адгезии. Известно [17], что шероховатость поверхностей частиц приводит к существенному ослаблению силы адгезии по сравнению с результатами, приведенными в [15]. Действительно, вычисление [18] силы адгезии между плоскостью с шероховатостью радиуса  $r$  и сферической частицей радиуса  $a$  приводит к следующему результату:

$$F_{adh} = \frac{AS^2}{24\Omega^2} \left( \frac{ra}{r+a} + \frac{a}{(1+rS^2/(2\Omega))^2} \right), \quad (9)$$

где  $A$  – постоянная Гамакера, определяемая через поверхностную энергию,  $S$  – чистота поверхности,  $\Omega = 0.132 \text{ нм}$  характеризует диаметр иона кислорода. Для лунного реголита постоянная Гамакера приблизительно равна  $4.3 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ , чистота поверхности варьируется в диапазоне от 1 до 0, причем с учетом газовых составляющих лунной экзосферы для освещенной стороны оценивается как  $S = 0.88$ , а для темной –  $S = 0.75$  [19]. Уравнение (9) учитывает слои адсорбированных молекул, наличие которых приводит к увеличению расстояния между частицами и к изменению сил взаимодействия. Адсорбция газа зависит от температуры, давления и состава атмосферы и/или экзосферы. Например, на Луне в условиях низкого давления малая толщина  $t \equiv \Omega/S$  слоев адсорбированных молекул приводит к большим

значениям сил адгезионного притяжения. Сила адгезии является близкодействующей и уменьшается на два порядка величины при увеличении расстояния между частицами на порядок. Кроме того, для расстояний, превосходящих 10 нм, начинают играть роль ретроградные эффекты уменьшения ван-дер-ваальсовых сил за счет взаимодействия индуцированных диполей, приводящие к уменьшению постоянной Гамакера [20]. Учет эффектов контактной деформации показывает [21], что сила адгезии остается равной силе притяжения при точечном контакте, в то время как площадь контакта возрастает.

Анализ, основанный на выражении (9), показывает, что учет эффекта шероховатости значительно (на 2–3 порядка величины) ослабляет силу адгезии по сравнению с ситуацией [15], когда шероховатость несущественна. Однако даже в случае, когда эффект шероховатости важен, электростатическая сила, как правило, не превосходит силу адгезии. Отрыв пылевых частиц от поверхности Луны оказывается возможным, если в результате каких-либо процессов частица поднимается на высоту порядка 10 нм за счет тех или иных процессов (например, соударений метеороидов с лунной поверхностью). При этом частица успевает приобрести заряд, достаточный для доминирования электростатической силы над гравитационной, а сила адгезии резко уменьшается, и, как следствие, происходит дальнейший подъем частицы. В результате частица достигает существенно больших высот.

Итак, вычисление предела прочности лунного реголита на растяжение при  $\rho_0 \approx 1.4 \text{ г/см}^3$  дает:  $\sigma_{\text{adh}} \sim 7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ . Рассматривая баланс между силой, создаваемой максимальным давлением в ударной волне (характеризуемым соотношением (4)), и суммой сил адгезии (характеризуемой  $\sigma_{\text{adh}}$ ), электростатического отталкивания и гравитации, определяем радиус  $r_B$  зоны вокруг эпицентра удара, ограничивающий область, в которой происходит отрыв пылевых частиц от лунной поверхности вследствие удара метеороида. При  $c_0 = 300 \text{ м/с}$  и  $\rho_0 \approx 1.4 \text{ г/см}^3$  находим  $r_B \approx 1.8 \cdot 10^5 u_i^{2/3} a_i$ . Эта величина значительно превосходит  $r_{IV}$ . Таким образом, можно утверждать, что большая часть частиц, отрывающихся от поверхности Луны при ударе метеороида о ее поверхность, происходит из зоны упругих деформаций. Следуя работе [22], оценим глубину откольного слоя, т.е. слоя, в котором фрагменты с поверхности лунной породы отделяются в результате взаимодействия с волной сжатия:

$$w = 0.5c_0\tau_+ \quad \text{если } r > r_{IV}, \quad (10)$$

где  $\tau_+$  – время положительной фазы ( $u_r > 0$ ) в ударной волне,  $u_r$  – горизонтальная компонента скорости в ударной волне. Отметим также, что при распространении ударной волны наряду с волной сжатия формируется волна разрежения. Взаимодействие волн сжатия и разрежения приводит к появлению вертикальной компоненты скорости  $u_z$  в ударной волне. При  $r > r_{IV}$  имеем  $u_r = (1 - 1.5)u_z$  [22]. Таким образом, в дальнейших вычислениях полагаем  $u_r \sim u_z$ . Исходя из выражения (10) для глубины откольного слоя  $w$  и среднего потока метеороидов на поверхности Луны, можно найти количество пылевых частиц  $N$ , отрывающихся в единицу времени от единицы площади лунной поверхности (и поднимающихся над ней) вследствие ударов метеороидов. В табл. 1 представлены результаты вычисления  $N$  для различных высот  $h$  над лунной поверхностью.

**Таблица 1.** Количество пылевых частиц, отрывающихся в единицу времени от единицы площади лунной поверхности вследствие ударов метеороидов, для различных высот

$h, \text{ м}$	0.1	1	10
$N, \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$	65	20	7

Зависимость  $N$  от высоты  $h$  обусловлена различными вертикальными скоростями в ударной волне на разных стадиях ее распространения. Нормированное на единицу распределение по размерам частиц, поднимающихся над поверхностью Луны вследствие ударов метеороидов, близко к нормированному распределению частиц по размерам в околоповерхностном слое лунного реголита. Таким образом, используя (6), можно определить нормированное на единицу распределение по размерам частиц, оторвавшихся от поверхности Луны в результате удара метеороида. Такая функция распределения приведена на рис. 3.

Нормированная функция распределения, представленная на рис. 3 и оказывающаяся справедливой на различных высотах, указывает на присутствие микрометровых частиц над лунной поверхностью. Данный факт отличает частицы, поднимающиеся над поверхностью Луны в результате ударов метеороидов, от частиц, обычно рассматриваемых при описании плазменно-пылевой системы, в которой над Луной парят наномасштабные и субмикронные частицы [5]. Рассмотрение только типичных для пылевой плазмы процессов (исключающих сильные возмущения такие, как удары метеороидов) позволяет объяснить присутствие микрометровых частиц (с размерами 2–3 мкм) только над областью лунного терминатора [9]. Во всех остальных случаях размеры

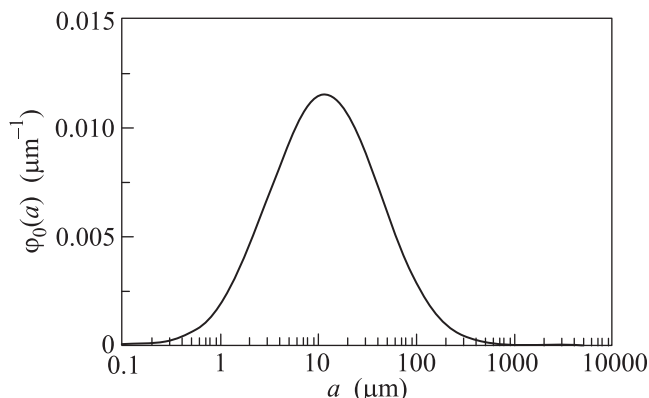


Рис. 3. Функция распределения по размерам частиц, покидающих поверхность Луны в результате ударов метеороидов

парящих пылевых частиц не превосходят нескольких сот нанометров.

Таким образом, удары метеороидов представляют собой важный источник микрометровых пылевых частиц в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны. Учет микрометровых пылевых частиц, образованных вследствие ударов метеороидов, может внести определенный вклад в описание процесса рассеяния солнечного света на пылевых частицах над областью лунного терминатора для объяснения свечения над этой областью, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor. В рамках будущих лунных миссий “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс” для обнаружения и идентификации микрометровых пылевых частиц, появляющихся в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны вследствие ударов метеороидов, могут быть использованы пьезоэлектрические ударные сенсоры [7]. Отличительными особенностями таких частиц являются высокие скорости (порядка 10–100 м/с) и микрометровые размеры.

Итак, показано, что с точки зрения отрыва пылевых частиц от лунной поверхности важными являются удары метеороидов. При рассмотрении процессов, значимых при отрыве пылевых частиц, следует учитывать адгезию, эффект которой ослабляется, если учитывать шероховатость поверхности. Определено количество соударений метеороидов с единицей площади лунной поверхности в единицу времени и проведена оценка предела прочности лунного реголита на растяжение за счет эффекта адгезии. Приведено описание процессов, происходящих при соударении высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью. Найдены характерные параметры зон испарения вещества, его плавления, разрушения частиц

лунного реголита, необратимых деформаций частиц, упругих деформаций вещества реголита. Показано, что большая часть частиц, покидающих поверхность Луны вследствие ударов метеороидов, происходит из зоны упругих деформаций вещества реголита. Для различных высот над Луной проведено вычисление количества пылевых частиц, отрывающихся в единицу времени от единицы площади лунной поверхности вследствие ударов метеороидов, и определена их функция распределения по размерам. Показано, что удары метеороидов представляют собой важный источник микрометровых пылевых частиц в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны.

Работа выполнена по Программе # 7 фундаментальных исследований Президиума РАН “Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные взрывные процессы в астрофизике”, а также при поддержке РФФИ (проекты # 15-02-05627, 15-32-21159) и Министерства образования и науки Российской Федерации (гранты МК-6935.2015.2, МК-7932.2015.8).

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. Копнин, С. И. Попель, *Письма в ЖЭТФ* **95**, 198 (2012).
5. С. И. Попель, С. И. Копнин, 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 V. Atamaniuk, *Phys. Plasmas* **22**, 123701 (2015).
10. R. H. Norton, J. E. Guinn, W. C. Livingston, G. A. Newkirk, and H. Zirin, *J. Geophys. Res.* **72**, 815 (1967).
11. J. J. Rennilson and D. R. Criswell, *The Moon* **10**, 121 (1974).

12. H. A. Zook and J. E. McCoy, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 2117 (1991).
13. 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).
14. S. I. Popel and L. M. Zelenyi, *J. Plasma Phys.* **79**, 405 (2013).
15. C. M. Hartzell and D. J. Scheeres, *Planet. Space Sci.* **59**, 1758 (2011).
16. G. Drolshagen, V. Dikarev, M. Landgraf, H. Krag, and W. Kuiper, *Earth Moon Planet* **102**, 191 (2008).
17. K. Meine, K. Kloss, T. Schneider, and D. Spaltmann, *Surface and Interface Analysis* **36**, 694 (2004).
18. Ю. Н. Извекова, С. И. Попель, Россия и Германия. *Научный гумбольдтовский журнал.* **7–8**, 70 (2014).
19. H. A. Perko, J. D. Nelson, and W. Z. Sadeh, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **127**, 371 (2001).
20. J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, 3rd Edition, Academic Press, N.Y. (2011), 703 p.
21. B. V. Derjaguin, V. M. Muller, and Yu. P. Toporov, *J. Colloid Interface Sci.* **53**, 314 (1975).
22. В. В. Адушкин, А. А. Спивак, *Подземные взрывы*, Наука, М. (2007), 578 с.