

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСФЕРУЛ ЛУННОГО РЕГОЛИТА В ИНИЦИИРОВАННЫХ УДАРАМИ МЕТЕОРОИДОВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ПРОЦЕССАХ

© 2020 г. С. И. Попель^{a, b, *}, А. П. Голубь^a, А. В. Захаров^a, Л. М. Зеленый^{a, c}

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

^c Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

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

Поступила в редакцию 15.08.2019 г.

После доработки 26.09.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Обсуждается возможность образования микросферул в инициированных ударами метеороидов о поверхность Луны плазменно-пылевых процессах. Показано, что из вещества зоны плавления, формируемой в результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность, образуются сферулы, которые первоначально поднимаются над поверхностью Луны, а затем падают на нее. Именно такие сферулы и наблюдаются при исследовании лунного грунта. Находясь над поверхностью Луны, жидкие сферулы затвердевают и в результате взаимодействия с электронами и ионами, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды, становясь частью плазменно-пылевой системы над Луной. Получены значения концентрации сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью, а также их распределение по размерам. Верхний предел размера сферул в их распределении обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов и составляет несколько микрометров. Размеры сферул, существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, большим 1 см. Для крупных метеороидов однозначную статистику по размерам построить не удастся. Поэтому возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные и субмикронные размеры. Для достаточно крупных сферул возможна лишь оценка размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Показано, что присутствие сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью может быть обнаружено в рамках будущих миссий “Луна-25” и “Луна-27” с помощью пьезоэлектрических датчиков.

Ключевые слова: пылевая плазма, Луна, микросферулы, метеороиды, будущие лунные миссии

DOI: 10.31857/S0367292120030105

1. ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении плазменно-пылевых систем существенное внимание уделяется исследованию формирования и роста пылевых частиц в самих этих системах [1–3]. Как правило, в лабораторной пылевой плазме рост частиц начинается с образования субнанометровых/нанометровых первичных (зародышевых) частиц. Процессы агломерации/коагуляции приводят к образованию частиц размером в несколько десятков нанометров, которые быстро приобретают электрический заряд. Рост пыли обычно продолжается до субмикронных или микронных размеров.

Активно изучаемым в настоящее время природным плазменно-пылевым объектом является пылевая плазма над поверхностью Луны (см., например, [4–14]). 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 [15]. Объяснение этого эффекта обычно связывают [16, 17] с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах. В рамках американской миссии LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”) [18, 19] было показано, что вокруг Луны вплоть до высот, по крайней мере, порядка нескольких сот километров присутствует непрерывно существующее облако субмикронной пы-

ли. В настоящее время в России готовятся миссии “Луна-25”, “Луна-26”, “Луна-27”, включающие в себя исследования свойств пыли и пылевой плазмы над лунной поверхностью и на орбите вокруг Луны [20].

Обычно в качестве пылевой компоненты плазмы над поверхностью Луны рассматривают частицы лунного реголита, поднятые либо в результате электростатических процессов (см., например, [8]), либо вследствие ударов метеороидов [21–23]. Однако существует вид частиц, образованных непосредственно в процессе эволюции плазменно-пылевой системы. В работах [22, 23] о них говорится как о каплях расплава, поднятых над Луной из зоны плавления вещества, образующейся при ударе метеороида о лунную поверхность. Поднимаясь над поверхностью Луны, жидкие капли расплава затвердевают, сохраняя при этом форму, близкую к сферической, и в результате взаимодействия, в частности, с электронами и ионами солнечного ветра, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды. Настоящая работа посвящена рассмотрению такого рода сферул.

В целом, сферулы являются достаточно типичным явлением при изучении космического вещества [24]. На Земле по внутренней структуре и составу различают два главных типа космических сферул [25–27]. Первый тип характеризуется концентрическим строением – металлическим ядром с высоким содержанием никеля (до 75%) и оболочкой магнетитового состава, где концентрация никеля составляет 7–9%. В ядре таких сферул часто присутствуют Os, Ir, Pt и Ru. Такие сферулы возникают за счет абляции железных метеороидов при вхождении в атмосферу. Размер таких сферул меняется от 0.7 до 300 мкм [28]. Космические сферулы второго типа состоят из поликристаллического агрегата магнетита-виюстита, в котором содержание никеля не более 1%. В них отмечается присутствие Si, Mg, Al, Ca, что указывает на их формирование в результате абляции каменных метеороидов [25].

На Луне не существует механизма абляции метеороидов при вхождении в атмосферу. Однако сферические образования представляют собой важную составляющую материала лунного реголита. В частности, имеется фракция сферул, значительно превышающих микронные размеры [29, 30]. Имеются и микросферулы. В настоящей работе основное внимание уделяется мелкозернистому материалу лунного реголита. Содержание сферул во фракциях менее 0.45 мм на всю глубину колонки реголита из лунного Моря Изобилия составляет несколько процентов от общего количества числа фракций и колеблется от 1–2% в относительно крупных фракциях до 3–4% в мелких [29]. Существует тенденция к увеличению

общего содержания сферических образований с уменьшением размера фракции. На рис. 1 представлены примеры фотографий [30] сферических частиц различного минерального состава, содержащихся в лунном грунте.

С точки зрения исследований сферических образований на Луне анализируются, в основном, образцы лунного грунта, собранные в рамках миссий “Аполлон-12”, -14, -16 и -17 (см., например, [31–34]). При этом существенное внимание уделяется определению возраста сферул и их распределения по возрасту, что важно, например, для анализа биотической эволюции на Земле. Вместе с тем, вопрос о распределении микросферул по размерам, важный для анализа плазменно-пылевых процессов, до сих пор открыт. Теоретическое исследование распределения микросферул по размерам оказывается возможным на основе метода, развитого в работах [21, 22], где изучается влияние потоков высокоскоростных метеороидов на плазменно-пылевую систему над Луной.

2. ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПАДЕНИЕ ПОТОКОВ МЕТЕОРОИДОВ НА ЛУННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Количество ударов метеороидов о лунную поверхность определяется значениями их потока. Здесь используются зависимости $F_i(m_i)$ [35], 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 $m_i + dm_i$. С функцией распределения ударников по массам связана их функция распределения по размерам a_i : $f_m(m_i) dm_i = f_a(a_i) da_i$.

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 из работы [21])). Средняя скорость приблизительно равна $\langle u_i \rangle \approx 27$ км/с.

Примеры функций распределения ударников по массам и по размерам для ситуации, соответствующей рис. 2 из работы [35], приведены на рис. 2. При выводе $f_a(a_i)$ предполагалось, что метеороиды имеют сферическую форму, а плотность их вещества одинакова $\rho_i \approx 3$ г/см³. Поскольку данные предположения весьма приближительны, удается аппроксимировать $f_a(a_i)$ непрерывной функцией, состоящей последовательно из четырех степенных функций. Данное представление полезно для оценки вклада различных (по массам и/или размерам) групп метеороидов в процесс формирования сферул. Количество соударений метеороидов, имеющих размеры, большие 10^{-5} см, с единицей площади лунной поверхности в единицу времени по порядку величины равно $N_i \approx 100$ м⁻² · сут⁻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. Отметим, что в соответствии с другими исследованиями соударений метеороидов с космическими телами (см., например, [36]) в данном рассмотрении не учитываются химические процессы разрушения молекул. 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 проводятся для ситуации, когда ударник состоит из сплошного габброидного анортозита, тогда как веществом мишени является пористый габброидный анортозит. Предполагается, что плотности ударника и мишени до со-

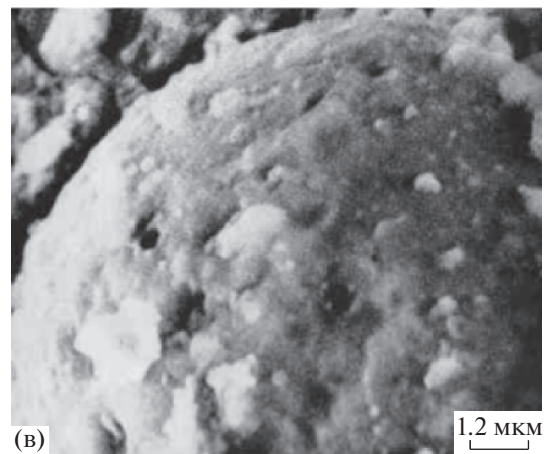
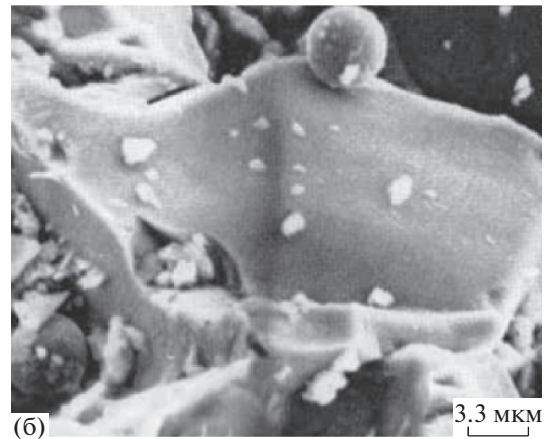
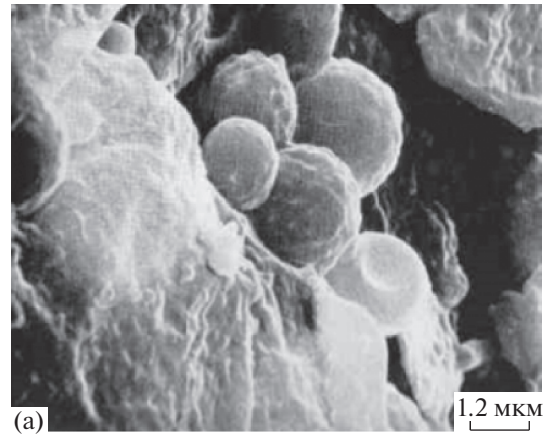


Рис. 1. Примеры фотографий [30] сферических частиц различного минерального состава, содержащихся в лунном грунте: участок поверхности клинопироксена, покрытый коркой существенно железистого состава, со сферическими частицами Fe-состава (“Луна-20”) (а); фрагмент габбро неправильной формы, на переднем плане зерно пироксена с прилипшим к нему силикатным шариком, в полости (слева снизу) другой силикатный шарик (“Луна-16”) (б); сферическая частица базальтового состава на поверхности зерна плагиоклаза (“Луна-20”) (в).

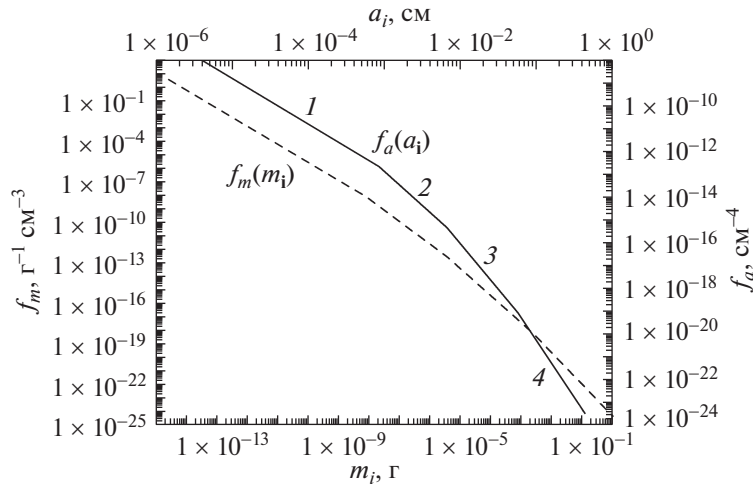


Рис. 2. Функции распределения по массам (штриховая кривая) и по размерам (сплошная кривая) метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью. Цифры 1–4 характеризуют участки функции $f_a(a_i)$, характеризуемые различными степенными функциями.

ударения соответственно равны $\rho_{i0} = 3 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{r0} = 1.4 \text{ г/см}^3$. Плотность вещества частиц реголита составляет $\rho_{r00} = 3 \text{ г/см}^3$. Концентрация частиц реголита равна $n_{reg} = 800 \text{ см}^{-3}$. Пористость мишени – $k = \rho_{i0}/\rho_{r0} = 2.14$. 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 Югонио. Линейная зависимость между указанными скоростями обычно достаточно хорошо описывает экспериментальные данные (см. [36]). В звуковой волне максимальное давление p_m и максимальная массовая скорость u_m за ее фронтом прямо пропорциональны друг другу: $p_m = \rho_{i0} c_0 u_m$, где c_0 – скорость звука в невозмущенном реголите, для которой используется значение $c_0 = 300 \text{ м/с}$ по аналогии с сухим песком [37].

В результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва, расположенного на глубине W_0 под поверхностью, формируются зоны (ср. с [21]), 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 ве-

щества реголита (IV), характеризующая значениями давления в нелинейной звуковой волне, меньшими динамического предела упругости (см. рис. 3). За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная. Анализ распространения ударной волны для приведенных выше параметров вычислений позволяет [22] 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.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СФЕРУЛ

Что касается формирования сферул, интерес представляют зоны I и II. Материал, выбрасываемый ударной волной из зоны испарения вещества (I), может конденсироваться. В результате чего могут формироваться сферулы. Однако на границе между зонами I и II скорость выброса вещества $u_v = \sqrt{2E_{cv}} \approx 6 \text{ км/с}$ превосходит вторую космическую скорость (для Луны), которая составляет 2.38 км/с . Здесь $E_{cv} \approx 18 \text{ МДж/кг}$ – удельная пороговая внутренняя энергия полного испарения (в условиях быстрой адиабатической механической разгрузки). Таким образом, вещество из зоны испарения I не возвращается на поверхность Луны. Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты [22]. Образуются равновесные капли, которые, поднимаясь над по-

верхностью Луны, затвердевают и, таким образом, формируются сферулы. На границе между зонами II и III скорость выброса вещества определяется соотношением $u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx 1.5$ км/с, где $E_{cmt} \approx 1.1$ МДж/кг – удельная пороговая внутренняя энергия полного плавления сплошного габброидного анортозита. То есть значительная часть вещества из зоны плавления (II) приобретает скорости между первой и второй космической скоростью для Луны, т.е. между 1.68 и 2.38 км/с. Именно такое вещество образует пылевое облако на больших высотах над Луной [22]. Однако существует доля вещества из зоны плавления, которое приобретает скорости между $u_{mt} = \sqrt{2E_{cmt}} \approx 1.5$ км/с и 1.68 км/с – первой космической скоростью для Луны. Из такого вещества также образуются сферулы, но они заведомо возвращаются на поверхность Луны. Именно такие сферулы и наблюдались при исследовании грунта, доставленного с Луны. Произведем расчет параметров, характеризующих эти сферулы.

Глубина так называемого откольного слоя, в котором фрагменты с поверхности лунной породы отделяются в результате взаимодействия с волной сжатия определяется следующим образом [21, 22]. В зоне линейных упругих деформаций вещества реголита (V) выражение для глубины указанного слоя имеет вид

$$w = 0.5c_0\tau_+, \quad \text{если } r > r_{IV}, \quad (4)$$

где τ_+ – время положительной фазы ($u_r > 0$) в ударной волне, u_r – горизонтальная компонента массовой скорости в звуковой волне. В приповерхностном слое за фронтом волны формируется волна разрежения и появляется вертикальная компонента u_z массовой скорости, которую имеют частицы реголита, покидающие лунную поверхность из зоны V. Из зон I–IV вещество выбрасывается ударной волной со скоростью, равной массовой скорости за ее фронтом, а для нахождения глубины откольного слоя используется линейная интерполяция

$$w(r) = W_0 + \frac{w_c - W_0}{r_{IV}} r, \quad \text{если } r \leq r_{IV}, \quad (5)$$

где

$$W_0 = \frac{2a_i \rho_{i0} \cos \theta}{\rho_{i0}} \quad (6)$$

– глубина эквивалентного центра метеороидного взрыва, θ – угол падения метеороида (относительно нормали к лунной поверхности).

Исходя из выражений для глубины откольного слоя w и среднего потока метеороидов на поверхности Луны, можно найти количество пылевых частиц, поднимающихся в единицу времени над единицей площади лунной поверхности след-

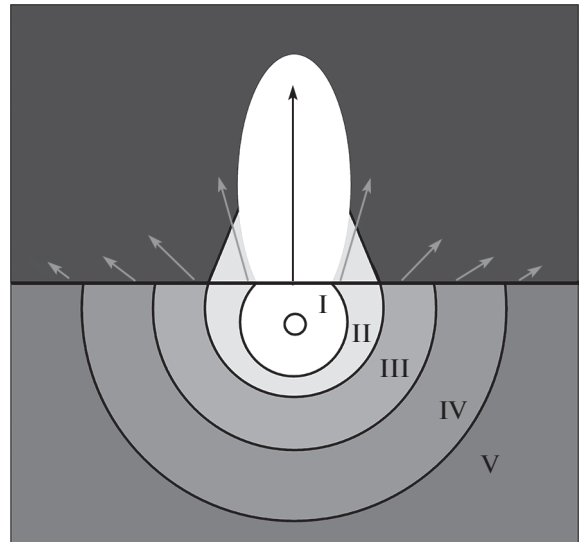


Рис. 3. Схема, характеризующая формирование под лунной поверхностью зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения частиц, составляющих лунный реголит, и их необратимых деформаций (III), зоны нелинейных упругих деформаций вещества реголита (IV), зоны линейных упругих деформаций 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 оттенками, что и соответствующие зоны показаны выбросы вверх испаренного и расплавленного вещества.

ствии ударов метеороидов из каждой из образующихся зон, в том числе, и из зоны плавления вещества (II). Расчеты показывают, что масса M_{II} расплава, выбрасываемого ударной волной, образуемой единичным ударником, в экзосферу Луны, составляет примерно 60% от всей массы расплавленного реголита и много больше массы ударника. M_{II} зависит от кинетической энергии ударника E_i . Так, для параметров вещества ударника и реголита, используемых в данной работе, $M_{II} \approx 0.3a_i^3 u_i^2 \approx 0.05E_i$. В свою очередь, масса расплава, выбрасываемого с поверхности Луны со скоростью меньшей первой космической скорости, определяется высокоскоростными ударами (со скоростями $u_i \geq 10$ км/с) и оценивается по формуле $M_{II}^* \approx 0.01a_i^3 u_i^2 \approx 0.002E_i$. Здесь M_{II} и M_{II}^* вычисляются в граммах, a_i – в сантиметрах, u_i – в км/с, а E_i – в кДж.

Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распа- дающуюся на фрагменты. Равновесные капли образуются, когда в капельно-паровом потоке

объем, занимаемый паром, становится сопоставимым с объемом жидкости [38]. Впоследствии капли затвердевают, превращаясь в сферулы, которые, в ситуации, когда расплав выбрасывается с поверхности Луны со скоростью меньшей первой космической скорости, в конечном итоге, оказываются в лунном грунте. Равновесное значение радиуса капли (и, соответственно, сферулы), образованной (вследствие удара метеороида) в зоне плавления вещества (II), имеет вид:

$$r_{\infty} = a_d = a_{sph} = \left(\frac{15 \sigma C_D}{4 \rho_d |\mathbf{a}|} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

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

$$\mathbf{a} = -\frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (8)$$

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. [38]), $\rho_d = 3 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 0.3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, а также учитывая, что большинство из капель расплава поднимаются из части зоны II, близкой ко внешней границе этой зоны, находим характерный радиус сферулы

$$a_{sph} \approx 1.5 \times 10^{-4} a_i^{1/2}, \quad (9)$$

где a_{sph} и a_i вычисляются в сантиметрах.

Таким образом, количество сферул, образуемых из вещества, имеющего происхождение в зоне плавления (II) и первоначально поднимающегося над поверхностью Луны со скоростями, меньшими первой космической скорости, приблизительно равно

$$N_{II}^* = \frac{M_{II}^*}{m_{sph}} \approx 0.5 \times 10^8 \frac{E_i}{a_i^{3/2}}. \quad (10)$$

Здесь, $m_{sph} = (4\pi/3)a_{sph}^3 \rho_{sph}$ – масса сферулы, E_i и a_i вычисляются соответственно в кДж и сантиметрах. Данные сферулы, в конечном итоге, оказываются на поверхности Луны.

Используя зависимости для N_{II}^* и M_{II}^* от E_i и a_i , а также функции распределения ударников по размерам и скоростям, $f_a(a_i)$ и $f_u(u_i)$, находим

значения потоков сферул и массы, содержащейся в сферулах, на поверхность Луны

$$G_{sph} = \int N_{II}^*(a_i, u_i) f_a(a_i) u f_u(u_i) da_i du_i, \quad (11)$$

$$G_{M, sph} = \int M_{II}^*(a_i, u_i) f_a(a_i) u f_u(u_i) da_i du_i. \quad (12)$$

Следует отметить, что потоки G_{sph} и $G_{M, sph}$ представляют собой средние величины, характеризующие большое количество ударов метеороидов по лунной поверхности. Вычисление указанных потоков позволяет получить следующие значения: $G_{sph} \approx 0.022 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $G_{M, sph} \approx 1.7 \times 10^{-16} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Поток массы сферул, падающих на поверхность Луны, составляет примерно 46% от потока массы метеороидов, удары которых по лунной поверхности являются причиной образования сферул.

Находясь над поверхностью Луны, жидкие сферулы затвердевают и в результате взаимодействия, в частности, с электронами и ионами солнечного ветра, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды. Используя величину $G_{sph} \approx 0.022 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, характерное значение скорости сферул $v_{sph} \approx 1.5 \text{ км/с}$, а также тот факт, что сферулы как поднимаются над поверхностью Луны, так и падают на нее, оценим концентрацию сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью $n_{sph} \approx 2G_{sph}/v_{sph} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$.

Распределение сферул $\phi(a_{sph})$ по размерам удаётся получить, используя однозначную зависимость a_{sph} от a_i (см. (9)), а также распределение ударников по размерам $f_a(a_i)$. Результаты вычислений представлены на рис. 4. Нормировка функции распределения $\phi(a_{sph})$ определяется выражением $\int \phi(a_{sph}) da_{sph} = 1$. Подобно функции $f_a(a_i)$ (см. рис. 2) функция распределения $\phi(a_{sph})$, представленная на рис. 4, является непрерывной функцией, состоящей последовательно из четырех степенных функций, что обусловлено использованием функции $f_a(a_i)$ при построении $\phi(a_{sph})$. Верхний предел сферул по размерам обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов (см., например, [35]). Размеры a_{sph} , существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, превосходящим 1 см. Для крупных метеороидов однозначную статистику по размерам построить не удастся. Поэтому возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные и субмикронные размеры. Для более крупных сферул возможна лишь оценка (с помощью формулы (9)) размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Что касается зарядов сфе-

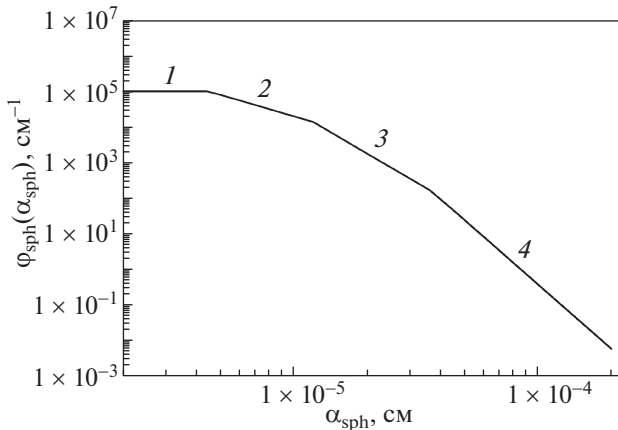


Рис. 4. Функция распределения сферул по размерам. Участки 1–4 соответствуют аналогичным участкам функции $f_a(a_i)$, изображенной на рис. 2.

рул, их величина зависит от размера сферулы и условий, в которых она находится. Например, если сферула находится над темной стороной Луны, для оценки ее заряда q_{sph} можно использовать зондовую модель: $q_{sph} \sim a_{sph}T_e/e$, где T_e – температура электронов солнечного ветра, $-e$ – заряд электрона. При $a_{sph} = 1$ мкм, $T_e = 1.4 \times 10^5$ К имеем $q_{sph} \sim 1$ фКл.

Несмотря на то, что сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью не так много ($n_{sph} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$), их присутствие может быть обнаружено в рамках миссий “Луна-25” и “Луна-27” с помощью пьезоэлектрических датчиков, которые будут установлены на спускаемых лунных аппаратах. Согласно исследованиям на Земле пороговое значение импульса частицы, которое может быть зафиксировано таким датчиком, составляет $10^{-12} \text{ Н} \cdot \text{с}$. По электрическому сигналу, который формируется в пьезоэлектрике в результате удара частицы и который должен фиксироваться в рамках исследований лунной пыли и пылевой плазмы, можно оценить скорость, заряд и массу частицы. Поскольку сферулы имеют достаточно большие скорости ($v_{sph} \approx 1.5 \text{ км/с}$), число сферул, которые могут быть зафиксированными пьезоэлектрическим датчиком (имеющим размер пьезоэлектрической поверхности $15 \times 15 \text{ см}^2$), достаточно велико ($\sim 10^{-2}$ частиц/с) для этой цели. По скорости и заряду сферулы могут быть идентифицированы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из вещества зоны плавления, формируемой в результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность, образу-

ются сферулы, которые первоначально поднимаются над поверхностью Луны, а затем падают на нее. Именно такие сферулы и наблюдались при исследовании грунта, доставленного с Луны. Находясь над поверхностью Луны, жидкие сферулы затвердевают и в результате взаимодействия с электронами и ионами, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды, становясь частью плазменно-пылевой системы над Луной. Получено распределение сферул по размерам. Верхний предел размеров сферул обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов и составляет несколько микрометров. Размеры сферул, существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, большим 1 см. Для крупных метеороидов однозначную статистику по размерам построить не удастся. Поэтому возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные и субмикронные размеры. Для достаточно крупных сферул возможна лишь оценка размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Хотя концентрация сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью невелика ($n_{sph} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$), их присутствие может быть обнаружено в рамках будущих лунных миссий с помощью пьезоэлектрических датчиков.

Обычно считается, что лунная поверхность представляет собой реголит, эволюционирующий в результате многократного дробления, обусловленного ударами метеороидов. При этом распределение частиц реголита по размерам описывается теорией Колмогорова [39]. Распределение сферул по размерам, отличное от логнормального распределения, полученное в настоящей работе, указывает на необходимость возможной модификации данной теории на случай лунного реголита. При этом важно также учитывать случайность (или, по крайней мере, переменность) интенсивности процесса дробления, которая, в частности, приводит к тому, что распределение размеров частиц может иметь вид произвольной смеси логнормальных распределений [40, 41].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01458).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boufendi L., Bouchoule A. // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. V. 3. P. 262.
2. Vladimirov S.V., Ostrikov K. // Phys. Rep. 2004. V. 393. P. 175.
3. Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A. Physics and applications of complex plasmas. London: Imperial College, 2005.

4. *Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M.* // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 59.
5. *Sternovsky Z., Chamberlin P., Horányi M., Robertson S., Wang X.* // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A10104.
6. *Stubbs T.J., Glenar D.A., Farrell W.M., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Delory G.T.* // *Planet. Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1659.
7. *Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Попель С.И.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2012. Т. 95. С. 198.
8. *Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н.* // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. P. 455.
9. *Лусин Е.А., Тараканов В.П., Петров О.Ф., Попель С.И., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Фортвов В.Е.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2013. Т. 98. № 11. С. 755.
10. *Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н., Афонин В.В., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Лусин Е.А., Петров О.Ф.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2014. Т. 99. С. 131.
11. *Буринская Т.М.* // *Физика плазмы.* 2014. Т. 40. С. 17.
12. *Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B.* // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 123701.
13. *Izvekova Yu.N., Morozova T.I., Popel S.I.* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2018. V. 46. P. 731.
14. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M., Dubinskii A.Yu.* // *Planet. Space Sci.* 2018. V. 156. P. 71.
15. *Norton R.H., Guinn J.E., Livingston W.C., Newkirk G.A., Zirin H.* // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 815.
16. *Rennilson J.J., Criswell D.R.* // *The Moon.* 1974. V. 10. P. 121.
17. *Zook H., McCoy J.* // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 2117.
18. *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.* // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 185. P. 93.
19. *Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z.* // *Nature.* 2015. V. 522. P. 324.
20. *Kuznetsov I.A., Hess S.L.G., Zakharov A.V., Cipriani F., Seran E., Popel S.I., Lisin E.A., Petrov O.F., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Koptin S.I.* // *Planet. Space Sci.* 2018. V. 156. P. 62.
21. *Попель С.И., Голубь А.П., Лусин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 103. С. 641.
22. *Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2017. Т. 105. С. 594.
23. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Бережной А.А., Зубко Е.С., Итен М., Лена Р., Спозетти С., Великодский Ю.И., Терещенко А.А., Атаманюк Б.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2018. Т. 108. С. 379.
24. *Адушкин В.В., Попель С.И.* // *Физика Земли.* 2012. № 3. С. 745.
25. *Finkelman R.V.* // *Science.* 1970. V. 167. P. 982.
26. *Brownlee D.E., Bates V.A., Wheelock M.M.* // *Nature.* 1984. V. 309. P. 603.
27. *Kosakevitch A., Disnar J.R.* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. P. 1073.
28. *Грачев А.Ф.* // *Физика Земли.* 2010. № 11. С. 3.
29. *Иванов А.В., Родэ О.Д., Стахеев Ю.И., Флоренский К.П.* // *Лунный грунт из Моря Изобилия, АН СССР, Ин-т геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского.* М.: Наука, 1974. С. 232.
30. *Родэ О.Д., Иванов А.В., Назаров М.А., Цимбалникова А., Юрек К., Гейл В.* // *Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита.* Прага: Академия, 1979.
31. *Culler T.S., Becker T.A., Muller R.A., Renne P.R.* // *Science.* 2000. V. 287. P. 1785.
32. *Levine J., Becker T.A., Muller R.A., Renne P.R.* // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. 15201.
33. *Zellner N., Delano J.* // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2015. V. 161. P. 203.
34. *Huang Y.H., Minton D.A., Zellner N.E.B., Hirabayashi M., Richardson J.E., Fassett C.I.* // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 6805.
35. *Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M., Krag H., Kuiper W.* // *Earth Moon Planet.* 2008. V. 102. P. 191.
36. *Мелощ Г.* *Образование ударных кратеров.* М.: Мир, 1994.
37. *Цветков В.М.* // *Журн. прикл. механ. и техн. физ.* 1963. № 5. С. 150.
38. *Melosh H.J., Vickery A.M.* // *Nature.* 1991. V. 350. P. 494.
39. *Колмогоров А.Н.* // *ДАН.* 1941. Т. 31. С. 99.
40. *Королев В.Ю.* // *Информатика и ее применения.* 2009. Т. 3. P. 60.
41. *Королев В.Ю.* // *Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов.* М.: Изд-во Московского ун-та, 2011.