

УДК 523.34-36

К ВОПРОСУ О ПОТОКАХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ, ЗАФИКСИРОВАННЫХ У ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ АППАРАТОМ CHANG'E-3

© 2021 г. А. П. Голубь^а, С. И. Попель^а, *

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.01.2021 г.

После доработки 10.02.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2021 г.

Проанализировано происхождение пылевых частиц в приповерхностном слое над лунной поверхностью, потоки которых измерялись в рамках лунной миссии КНР Chang'E-3. Рассмотрены частицы лунного реголита, поднятые над поверхностью Луны либо в результате электростатических процессов, либо вследствие ударов метеороидов. Оказывается, что основной вклад в наблюдаемые потоки массы пылевых частиц вносили микрометровые пылевые частицы, происхождение которых обусловлено выбросами вещества реголита с лунной поверхности в результате ударов метеороидов. Проведены теоретические расчеты потока массы пылевых частиц, которые оседают на измерительной поверхности космического аппарата Chang'E-3, расположенной на высоте 190 см над лунной поверхностью. Оказывается, что теоретическая величина примерно в 7 раз превосходит измеренное в рамках миссии Chang'E-3 значение потока массы пылевых частиц. Данное расхождение может быть обусловлено как неточностью используемых при расчетах параметров, характеризующих условия на Луне и свойства лунного реголита, так и тем фактом, что основная часть массы, поднимающейся над поверхностью Луны в результате ударов метеороидов, содержится в микрометровых частицах, значительная часть которых могла осыпаться с измерительной поверхности космического аппарата Chang'E-3 и соответственно, не была учтена в измерениях.

Ключевые слова: Луна, реголит, лунная миссия КНР Chang'E-3, пылевые частицы, пылевая плазма, метеороиды

DOI: 10.31857/S0320930X2104006X

ВВЕДЕНИЕ

В рамках лунной миссии КНР Chang'E-3 проводились измерения потока пыли у поверхности Луны (Li и др., 2019; Zhang и др., 2020). Оказывается, что на высоте 190 см над лунной поверхностью масса пыли, оседающей на единицу измерительной поверхности регистратора за год, составляет 21.4 мкг/см^2 , что соответствует средней за год плотности потока массы $0.68 \times 10^{-12} \text{ г/(см}^2 \text{ с)}$ (Li и др., 2019). Данное исследование поддерживает имеющийся тренд в исследованиях Луны, для которого свойственно повышенное внимание, уделяемое пыли и пылевой плазме над лунной поверхностью. Так, например, в миссии NASA LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”) (Horányi и др., 2014) лунная пыль изучалась посредством наблюдений с орбиты. В настоящее время в России готовятся миссии Луна-25, Луна-26, Луна-27, в задачи которых входят исследования свойств пыли и пылевой плазмы над лунной поверхностью и на орбите вокруг Луны (Kuznetsov и др., 2018). Проект Международной

лунной исследовательской станции (International Lunar Research Station), в котором участвуют, в частности, китайские и российские ученые, также предполагает исследования лунной пыли.

Соответственно проводятся и теоретические исследования, в рамках которых обычно в качестве пылевой компоненты над поверхностью Луны рассматривают частицы лунного реголита, поднятые либо в результате электростатических процессов (см., например, Попель и др., 2013; Popel и др., 2018), либо вследствие ударов метеороидов (Попель и др., 2016; 2017).

Повышенный интерес к исследованиям лунной пыли, кроме общего интереса, связан, в частности, с тем, что она представляет собой существенный фактор риска. Так, за счет адгезии лунная пыль прилипает к скафандрам астронавтов, поверхностям космических аппаратов, приборам и т.д., что может угрожать работе систем. На поверхностях приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения. В результате приборы могут слишком сильно нагреваться. Пыль может негативно сказываться на

здоровье астронавтов. Так, из-за прилипания пыли к скафандрам, пыль попадает внутрь лунного модуля после возвращения в него астронавтов. Весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты могут вдыхать лунную пыль, которая в состоянии невесомости присутствует в воздухе модуля.

Целью настоящей работы является попытка объяснения данных, касающихся лунной пыли, полученных в рамках миссии Chang'E-3, на основе имеющихся теоретических представлений.

ПЫЛЬ, ПОДНЯТАЯ НАД ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Считается (см., например, Popel и др., 2018), что 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 и электроны, и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их электростатическому взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Согласно результатам исследований (Попель и др., 2013) характерный размер a и характерная концентрация n_d заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются, соответственно, значениями, меньшими или порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} . Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе и фотоэлектронов, выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхностей парящих пылевых частиц). Скорость v_d пылевых частиц, как правило, удовлетворяет условию $v_d \leq 1 \text{ м/с}$ (см. рис. 1).

При этом следует иметь в виду, что для каждого размера пылевых частиц существует определенное критическое значение угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, превосходящее 76° (Колесников, Яковлев, 1997), такое, что для меньших значений θ подъем частиц ока-

зывается невозможным. Причиной указанного ограничения является тот факт, что на пылевую частицу действуют разнонаправленные электростатическая и гравитационная силы. Условием отрыва положительно заряженной пылевой частицы от положительно заряженной поверхности Луны является доминирование электростатической силы над силой гравитационного притяжения. Величина электростатической силы зависит от заряда пылевой частицы q_d . В свою очередь, на значение q_d существенным образом влияет концентрация фотоэлектронов. При значениях θ , меньших критического, именно фотоэлектроны, которые при попадании на пылевую частицу стремятся уменьшить ее (положительный) заряд, препятствуют доминированию электростатической силы над силой гравитационного притяжения.

Измерения потока пыли, выполненные аппаратом Chang'E-3, проводились на поверхности Луны в точке с координатами 44.12° N , 19.51° W (Га и др., 2015). Поскольку наклон оси Луны относительно плоскости эклиптики составляет всего 1.5424° , отличие лунной широты от угла θ достаточно небольшое. Таким образом, рассматриваемая ситуация соответствует значениям углов $\theta < 76^\circ$, и учитывать пыль, поднятую над лунной поверхностью в светлое время лунных суток в результате электростатических процессов, не следует.

Над темной частью Луны фотоэлектроны отсутствуют. Концентрация заряженной пыли оценивается при этом из соотношения $n_d \sim n_{e,S} / |Z_d|$ (Popel и др., 2015), где $n_{e,S}$ – концентрация электронов солнечного ветра, Z_d – зарядовое число пылевой частицы ($q_d = -Z_d e$ – заряд пылевой частицы, $-e$ – заряд электрона). Для пылевых частиц с размерами порядка 100 нм оценка их концентрации над темной частью Луны дает $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$. Полагая справедливыми эти значения размера пылевых частиц и их концентрации, а также, что $v_d \sim 10 \text{ см/с}$, находим значение потока массы пылевых частиц $\sim m_d n_d v_d / 4 \sim 10^{-15} - 10^{-14} \text{ г/(см}^2 \text{ с)}$, являющееся значительно меньшим (примерно на 2–3 порядка величины) значения потока массы пыли, измеренного Chang'E-3 ($0.68 \times 10^{-12} \text{ г/(см}^2 \text{ с)}$).

Итак, механизм происхождения пылевых частиц, наблюдаемых в миссии Chang'E-3, отличается от механизма, вызванного электростатическими процессами и описанного в работах (Попель и др., 2013; Popel и др., 2015). Таким механизмом могут быть эффекты, связанные с ударами метеороидов.

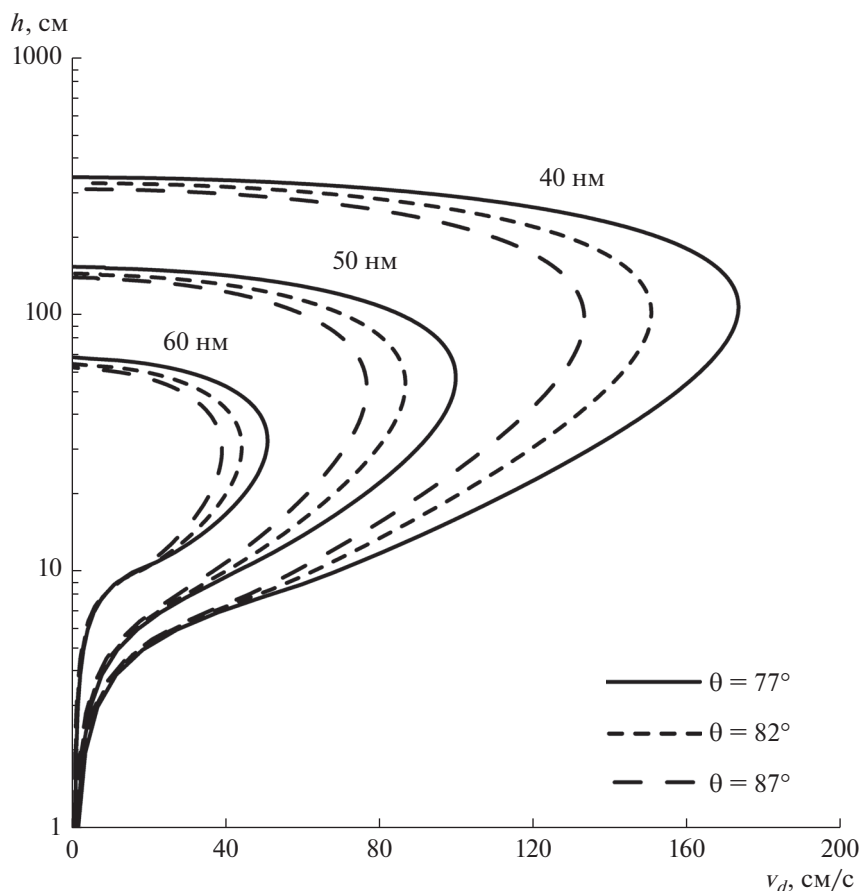


Рис. 1. Характерные скорости пылевых частиц размера 40, 50, 60 нм над поверхностью Луны для значений угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равным 77° , 82° , 87° , вычисленные на основе модели (Попель и др., 2013) для условий, соответствующих участкам лунного реголита.

ПОТОКИ ПЫЛИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ УДАРАМИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТЕОРОИДОВ

Луна фактически непрерывно подвержена воздействию метеороидов. Количество ударов метеороидов о лунную поверхность определяется значениями их потока. Ниже проводится усреднение по скоростям и массам мелких метеороидов, для которых имеются данные статистики (Drolshagen и др., 2008), что позволяет получать интегральные (в широком интервале размеров) значения среднего потока пыли от лунной поверхности на достаточно больших временах (например, порядка 1 года) и на больших площадях (порядка площади поверхности Луны), что важно для объяснения измерений, выполненных Chang'E-3.

Здесь используются зависимости $F_i(m_i)$ (Drolshagen и др., 2008), 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:

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

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

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

а $f_m(m_i) dm_i$ дает значение концентрации ударников с массами в интервале от m_i до $m_i + dm_i$. С функцией распределения ударников по массам связана их функция распределения по размерам a_i : $f_m(m_i) dm_i = f_a(a_i) da_i$.

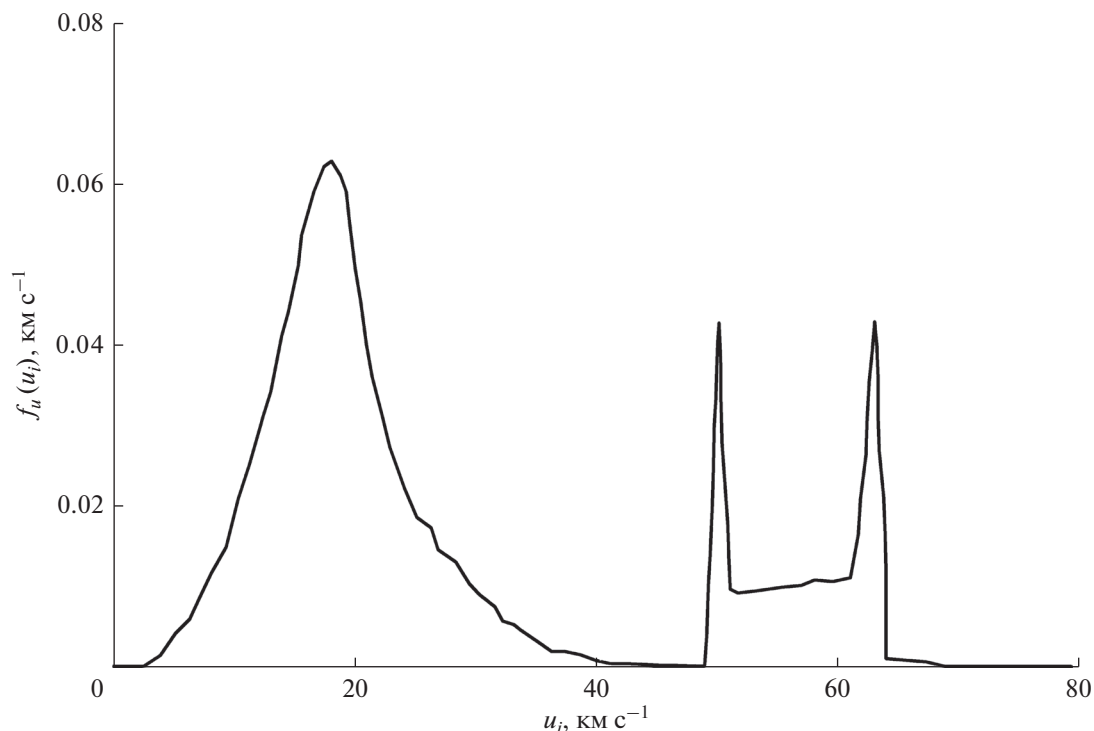


Рис. 2. Функция распределения по скоростям метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью.

Средняя скорость ударников определяется следующим образом:

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

Функция распределения ударников по скоростям $f_u(u_i)$ имеет три локальных максимума (при $u_i \approx 18, 50, 63$ км/с (см. рис. 2)). Средняя скорость приблизительно равна $u_i \approx 27$ км/с.

Примеры функций распределения ударников по массам и по размерам для ситуации, соответствующей рис. 2 из работы (Drolshagen и др., 2008), приведены на рис. 3. 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 аппроксимиро-

вать $f_a(a_i)$ 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 пылевых частиц. Рассматривались четыре группы метеороидов. В табл. 1 для каждой группы метеороидов представлены значения величин, характеризующих метеороидный поток: интервалы радиусов частиц a_i и их масс m_i в группе, интегральные (по каждой из групп) плотности потока массы $F_{i,M}$ и энергии $F_{i,E}$ частиц.

Количество соударений метеороидов, имеющих размеры, большие 10^{-5} см, с единицы площади лунной поверхности в единицу времени по порядку величины равно $N_i \approx 100$ м⁻² сутки⁻¹ (здесь имеются в виду земные сутки). Значительное большинство метеороидных ударов о лунную по-

Таблица 1. Величины, характеризующие поток метеороидов для различных групп метеороидов

	a_i , см	m_i , г	$F_{i,M}$, кг м ⁻² с ⁻¹	$F_{i,E}$, Дж м ⁻² с ⁻¹
Группа 1	$0.43 \times 10^{-5} - 0.86 \times 10^{-3}$	$10^{-15} - 8 \times 10^{-9}$	0.19×10^{-16}	0.18×10^{-7}
Группа 2	$0.86 \times 10^{-3} - 0.67 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-9} - 3.7 \times 10^{-6}$	0.27×10^{-15}	0.24×10^{-6}
Группа 3	$0.67 \times 10^{-2} - 0.057$	$3.7 \times 10^{-6} - 2.3 \times 10^{-3}$	0.65×10^{-15}	0.60×10^{-6}
Группа 4	0.057–0.43	$2.3 \times 10^{-3} - 1$	0.26×10^{-15}	0.24×10^{-6}

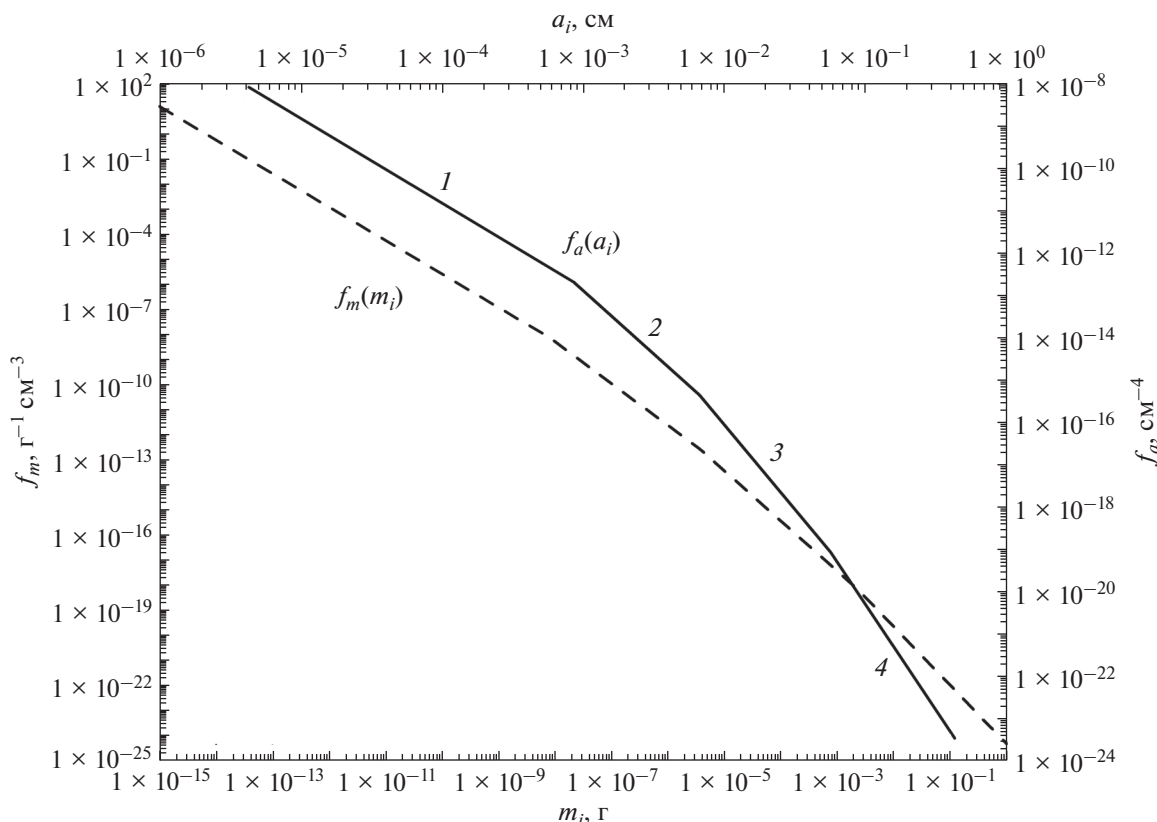


Рис. 3. Функции распределения по массам (пунктирная кривая) и по размерам (сплошная кривая) метеороидов, соударяющихся с лунной поверхностью. Цифры 1–4 характеризуют участки функции распределения по размерам, характеризующиеся различными степенными функциями.

верхность осуществляется ударниками субмикронных и микронных размеров. Однако масса выбрасываемого реголита в открытое пространство над лунной поверхностью пропорциональна потоку энергии метеороидов и определяется, в основном, ударами более крупных метеороидов с размерами порядка 100–1000 мкм (группа 3). Для таких метеороидов высокоскоростной удар о лунную поверхность подобен сильному взрыву, в результате которого в реголите образуется возмущенная область с размерами, значительно превышающими как размер ударника, так и характерный размер частиц реголита. Это обстоятельство позволяет отвлечься от чрезвычайно сложной в описании структуры реголита (Fechtig и др., 1974; Susorney и др., 2018) и рассматривать его как однородную пористую среду.

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 удель-

ная 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 эквивалентного центра метеороидного взрыва. В конечном итоге ослабевающая ударная волна трансформируется в линейную звуковую волну. На рис. 4 представлены зоны, формируемые вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва при распространении ударной волны и характеризующие происходящие при этом процессы: зона испарения вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения и необратимых деформаций частиц, составляющих лунный реголит (III), зона обратимых упругих деформаций частиц (IV), характеризующаяся значениями давления за ударной волной, меньшими динамического предела упругости и включающая в себя зону акустических возмущений (V).

Полагая скорость звука в невозмущенном реголите равной $c_0 = 300$ м/с, пористость среды – 2.14, а

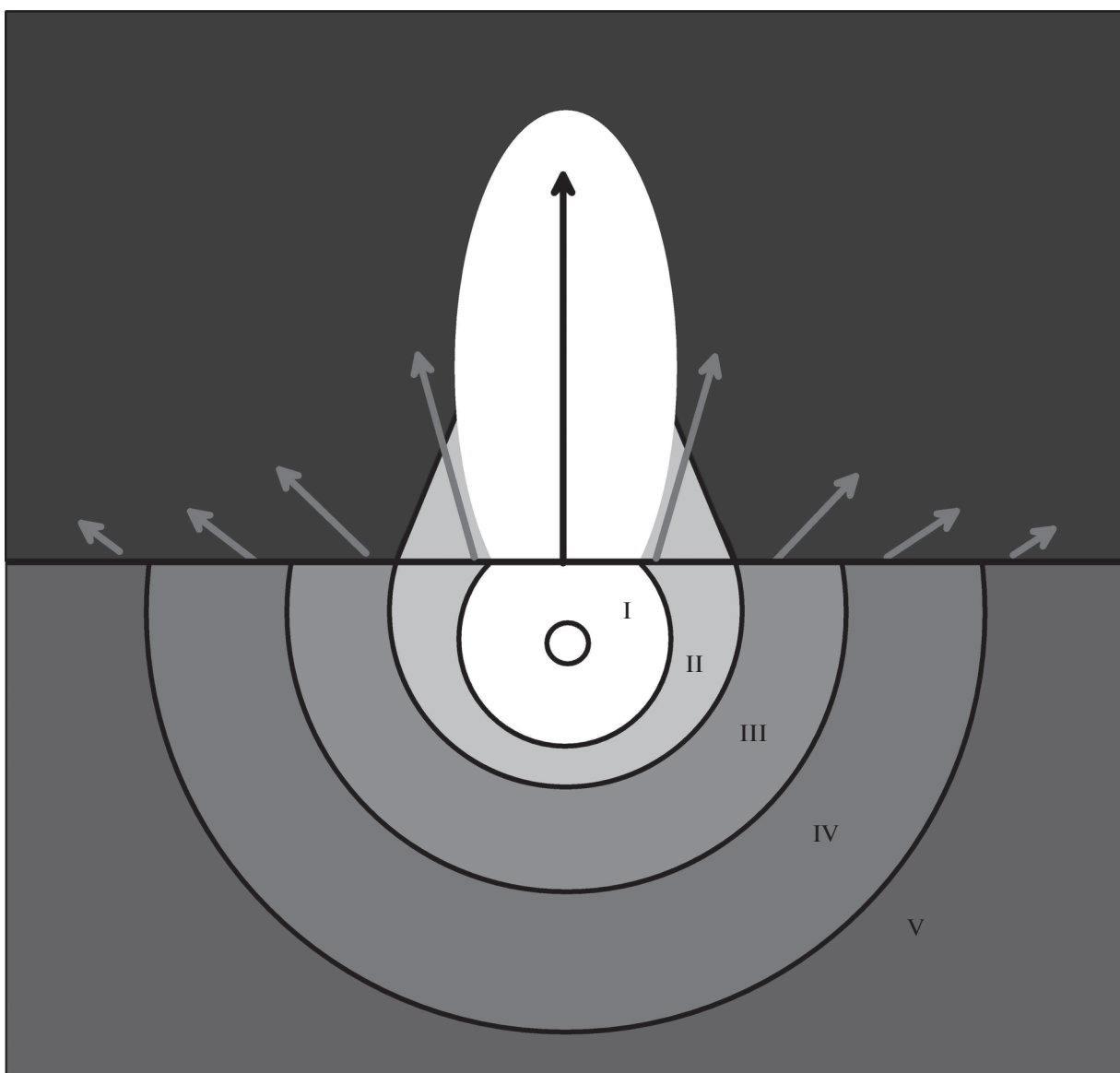


Рис. 4. Схема, характеризующая формирование на лунной поверхности вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва зоны испарения вещества (I), зоны плавления вещества (II), зоны разрушения и необратимых деформаций частиц лунного реголита (III), зоны упругих деформаций частиц (IV), включающей в себя зону акустических возмущений вещества реголита (V). Стрелки характеризуют выброс материала (в том числе и пылевых частиц) с высокими скоростями с поверхности Луны из зон I–V.

плотность верхнего слоя реголита — $\rho_0 \approx 1.4 \text{ г/см}^3$ (Мелош, 1994) и анализируя распространение ударной волны, можно определить радиусы границ зон I, II, III и IV: $r_I \approx 0.31u_i^{2/3}a_i$, $r_{II} \approx 0.58u_i^{2/3}a_i$, $r_{III} \approx 0.93u_i^{2/3}a_i$, $r_{IV} \approx 1.3u_i^{2/3}a_i$, где a_i — радиус ударника, а скорость u_i измеряется в км/с. На границах между выделенными зонами массовая скорость за фронтом ударной волны принимает значения 6, 1.5, 0.6 и 0.3 км/с соответственно. Таким образом, выбрасываемое метеороидом вещество реголита с лунной поверхности может улетать довольно далеко от точки метеороидного удара.

Кроме того, для части выбрасываемого с лунной поверхности вещества скорость выброса материала может быть выше второй космической скорости для Луны (2.4 км/с). Естественно, эта часть вещества не должна учитываться при описании осадения пыли на измерительную поверхность регистратора Chang'E-3.

Максимальное давление p_m в звуковой волне на расстоянии r_{IV} от эквивалентного центра метеороидного взрыва приблизительно равно:

$$p_m(r_{IV}) = \rho_0 c_0^2 \approx 0.13 \text{ ГПа.} \quad (1)$$

Лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов размером от пылевых частиц до нескольких метров в поперечнике, стекол, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т.д. Преобладают в реголите окатанные частицы со следами оплавления и спекания. Распределение по размерам частиц, составляющих лунный реголит, хорошо описывается (Голубь и др., 2012) формулой Колмогорова, характеризующей материалы, сформированные в результате многократного дробления породы:

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

где $t = (\ln a - \ln(a_K))/\sigma_K$, a – характерный размер частицы, $a_K = 61.56$ мкм, $\sigma_K = 1.29$. $\Phi_K(t)$ – вероятность обнаружить частицу лунного реголита с радиусом (характерным размером), меньшим a . Распределение с указанными параметрами (см. рис. 5) соответствует данным измерений (Colwell и др., 2007) в интервале размеров частиц реголита на поверхности Луны от 20 до 500 мкм и согласуется с выводами (Colwell и др., 2007) о том, что лунная поверхность представляет собой реголит, эволюционирующий в результате многократного дробления в результате ударов метеороидов. В работе (Адушкин и др., 2007) показано, что для случая многократного дробления распределение Колмогорова остается справедливым, по крайней мере для размеров частиц, больших 70 нм, что позволяет нам продлить полученное на основе данных (Colwell и др., 2007) распределение пылевых частиц лунной поверхности в сторону меньших размеров вплоть до размеров порядка нескольких десятков нм.

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

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

$$\int_0^{\infty} \phi_0(a) da = 1.$$

Для определения предела прочности реголита на растяжение

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

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

Вычисление (Извекова, Попель, 2014) силы адгезии между плоскостью с шероховатостью ра-

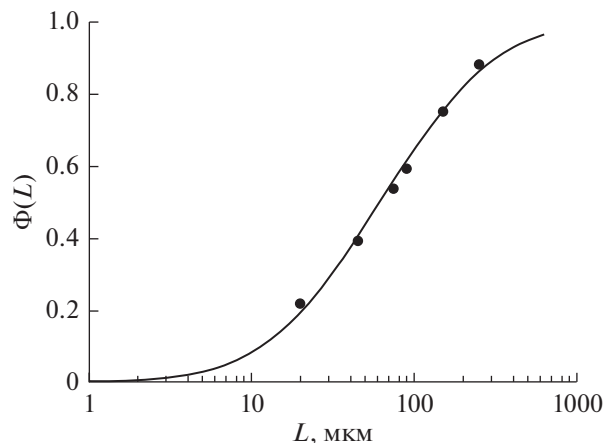


Рис. 5. Теоретическое распределение Колмогорова, описывающее данные наблюдений размеров (L) частиц реголита на поверхности Луны (сплошная кривая). Точки соответствуют данным, приведенным в работе (Colwell и др., 2007).

диуса r и сферической частицей радиуса a приводит к следующему результату:

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

где A – постоянная Гамакера, определяемая через поверхностную энергию, S – чистота поверхности, $\Omega = 0.132$ нм характеризует диаметр иона кислорода. Для лунного реголита постоянная Гамакера приблизительно равна 4.3×10^{-20} 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 – $S = 0.75$ (Perko и др., 2001). Уравнение (2) учитывает слой 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 близкой к действительной 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 сил Ван-дер-Ваальса за счет взаимодействия индуцированных диполей, приводящие к уменьшению постоянной Гамакера (Israelachvili, 2011). Учет эффектов контактной деформации показывает (Derjaguin и др., 1975), что сила адгезии остается равной силе при-

Таблица 2. Потоки пылевых частиц $F_d(h)$ для различных высот h над лунной поверхностью

h , см	10	100	1000
$F_d(h)$, м ⁻² сутки ⁻¹	21	7	2

тяжения при точечном контакте, в то время как площадь контакта возрастает.

Анализ, основанный на выражении (2), показывает, что учет эффекта шероховатости значительно (на 2–3 порядка величины) ослабляет силу адгезии по сравнению с ситуацией, 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 $\rho_0 \approx 1.4$ г/см³ дает: $\sigma_{adh} \sim 7 \times 10^{-3}$ Па. Рассматривая баланс между силой, создаваемой максимальным давлением в акустической волне (характеризуемым соотношением (1)) и суммой сил адгезии (характеризуемой σ_{adh}), электростатического отталкивания и гравитации, определяем радиус r_B зоны вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва, ограничивающий область, в которой происходит отрыв пылевых частиц от лунной поверхности вследствие удара метеороида. При $c_0 = 300$ м/с и $\rho_0 \approx 1.4$ г/см³ находим $r_B \approx 1.8 \times 10^5 u_i^{2/3} a_i$. 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 акустических возмущений. Следуя работе (Адушкин, Спивак, 2007), оценим глубину откольного слоя, т.е. слоя, в котором фрагменты с поверхности лунной породы отделяются в результате взаимодействия с волной сжатия:

$$w_c = 0.5c_0\tau_+, \text{ если } r > r_{IV},$$

где τ_+ — время положительной фазы ($u_r > 0$) в акустической волне, u_r — горизонтальная компонента массовой скорости. В приповерхностном слое за фронтом волны формируется волна разре-

жения 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:

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

где

$$W_0 = \frac{2a_i \rho_{i0} \cos \psi}{\rho_{i0}}$$

— глубина эквивалентного центра метеороидного взрыва, ψ — угол падения метеороида (между направлением падения метеороида и вертикалью к лунной поверхности).

Исходя из выражений для глубины откольного слоя w и среднего потока метеороидов на поверхности Луны, можно найти для различных высот h над лунной поверхностью потоки $F_d(h)$ пылевых частиц, отрывающихся от поверхности Луны и поднимающихся над ней вследствие ударов метеороидов. В табл. 2 представлены результаты вычисления величины $F_d(h)$ для некоторых высот h .

Измерительная поверхность лунного аппарата Chang'E-3 находилась на высоте $h = 190$ см над лунной поверхностью. Для потока пылевых частиц, выбиваемых ударами метеороидов с лунной поверхности и достигающих высоты $h = 190$ см, их количество и массы равны

$$F_d(h = 190 \text{ см}) \approx 5.6 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

$$F_{d,M}(h = 190 \text{ см}) \approx 9.8 \times 10^{-12} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Пылевые частицы, поднимающиеся с лунной поверхности, подверженной метеороидным ударам, падают на космический аппарат, если он находится на обращенной навстречу метеороидному потоку стороне Луны. В противном случае пылевые частицы метеороидного происхождения на космический аппарат практически не попадают. Поэтому теоретическая оценка количества пыли, оседающей на измерительной поверхности космического аппарата, которая расположена на высоте 190 см над лунной поверхностью, представляет собой среднюю по времени величину, равную половине от количества поднимающейся пыли:

$$0.5F_{d,M}(h = 190 \text{ см}) \approx 5 \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Эта величина примерно в 7 раз превосходит измеренное в рамках миссии Chang'E-3 значение потока массы пылевых частиц (0.68×10^{-12} г см⁻² с⁻¹).

Данное расхождение может быть обусловлено как неточностью используемых при расчетах параметров, характеризующих условия на Луне и свойства лунного реголита, так и тем фактом, что основная часть массы, поднимающейся над поверхностью Луны в результате ударов метеороидов, содержится в микрометровых пылевых частицах (см. Попель и др., 2016), которые слабее (чем наномасштабные или субмикронные) подвержены действию сил адгезии. Поэтому значительная часть микрометровых частиц могла осыпаться с измерительной поверхности космического аппарата Chang'E-3 и, соответственно, не была учтена в измерениях.

В рассмотренной модели не учитывались макроударники, создающие кратеры в несколько метров диаметром (см., например, Sprenger и др., 2016; Drolshagen и др., 2020), поскольку те макроудары, которые были в прошлом, уже внесли свой вклад в многократное дробление лунного грунта, и таким образом, их воздействие включено в распределение Колмогорова, характеризующее лунный грунт. Что касается наблюдений аппарата Chang'E-3, нет оснований считать, что за время наблюдений было какое-то воздействие ударов крупных космических тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, проведен анализ механизмов подъема пылевых частиц, которые наблюдались в рамках лунной миссии КНР Chang'E-3 на высоте 190 см над лунной поверхностью. Рассматривались частицы лунного реголита, поднятые либо в результате электростатических процессов, либо вследствие ударов метеороидов. Оказывается, что основной вклад в наблюдаемые потоки массы пылевых частиц вносили микрометровые пылевые частицы, происхождение которых обусловлено выбросами вещества реголита с лунной поверхности в результате ударов метеороидов. Поскольку лунная поверхность практически всегда подвержена воздействию потока метеороидов, данный эффект приводит к формированию потоков пылевых частиц над лунной поверхностью, которые не связаны с временем лунных суток, каких-то выделенных областей лунных широт и т.д. Проведены теоретические расчеты потока массы пылевых частиц, которые оседают на измерительной поверхности космического аппарата Chang'E-3, расположенной на высоте 190 см над лунной поверхностью. Оказывается, что теоретическая величина примерно в 7 раз превосходит измеренное в рамках миссии Chang'E-3 значение потока массы пылевых частиц. Данное расхождение может быть обусловлено как неточностью используемых при расчетах параметров, характеризующих условия на Луне и свойства лунного реголита, так и тем фактом, что основная часть массы, подни-

мающейся над поверхностью Луны в результате ударов метеороидов, содержится в микрометровых частицах, которые слабее (чем наномасштабные или субмикронные частицы) подвержены действию сил адгезии. Поэтому значительная часть микрометровых частиц могла осыпаться с измерительной поверхности космического аппарата Chang'E-3 и, соответственно, не была учтена в измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И. Наночастицы в опытах по разрушению скальных пород взрывом // Докл. РАН. 2007. № 2. С. 247–250.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 578 с.
- Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н., Копнин С.И., Попель С.И. Плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. № 4. С. 198–204.
- Извекова Ю.Н., Попель С.И. Адгезия мелкодисперсных частиц в природе // Россия и Германия. Научный гумбольдтовский журнал. 2014. № 7–8. С. 70–74.
- Колесников Е.К., Яковлев А.Б. Условие электростатической левитации микрочастиц лунного реголита // Астрон. вестн. 1997. Т. 31. № 1. С. 70–71 (Kolesnikov E.K., Yakovlev A.B. Condition for the Electrostatic Levitation of Lunar-Regolith Microparticles // Sol. Syst. Res. 1997. V. 31. № 1. P. 62–63).
- Мелюш Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.
- Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. Пылевая плазма у поверхности Луны // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 6. С. 455–466 (Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu.N. Dusty Plasma at the Surface of the Moon // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 6. P. 419–429).
- Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М. Удары высокоскоростных метеороидов и отрыв пылевых частиц от поверхности Луны // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 9. С. 641–646.
- Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М. Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 10. С. 594–599.
- Colwell J.E., Batiste S., Horányi M., Robertson S., Sture S. The lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics // Rev. Geophys. 2007. V. 45. P. RG2006, 26 p.
- Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // J. Colloid Interface Sci. 1975. V. 53. № 2. P. 314–326.
- Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M., Krag H., Kuiper W. Comparison of meteoroid flux models for near Earth space // Earth, Moon and Planet. 2008. V. 102. P. 191–197.
- Drolshagen E., Ott T., Koschny D., Drolshagen G., Schmidt A.K., Poppe B. Velocity distribution of larger meteoroids and

- small asteroids impacting Earth // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 184. P. 104869.
- Fa W., Zhu M.-H., Liu T., Plescia J.B.* Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 179–187.
- Fechtig H., Hartung J.B., Nagel K., Neukum G., Storzer D.* Lunar microcrater studies, derived meteoroid fluxes, and comparison with satellite-borne experiments // *Fifth Lunar and Planet. Sci. Conf. Proc.* 1974. V. 3. P. 2463–2474.
- 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. V. 185. № 1–4. P. 93–113.
- Israelachvili J.N.* *Intermolecular and Surface Forces.* 3rd Edition. N.Y.: Acad. Press, 2011. 703 p.
- 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., Kopnin S.I.* Numerical modelling of the Luna-Glob lander electric charging on the lunar surface with SPIS-DUST // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 156. P. 62–70.
- Li D., Wang Y., Zhang H., Zhuang J., Wang X., Wang Y., Yang S., Sun Z., Wang X., Chen L., Yao R., Zou X., Ma J., Cui Y., Wang X., Li C., Zhang H., Li X., Gao X., Cui X., Zhang B., Li W., Lin H.* In-situ measurements of lunar dust at the Chang'E-3 landing site in the northern Mare Imbrium // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2019. V. 124. № 8. P. 2168–2177.
- Perko H.A., Nelson J.D., Sadeh W.Z.* Surface cleanliness effect on lunar soil shear strength // *J. Geotechn. and Geoenvironment. Engineering.* 2001. V. 127. № 4. P. 371–383.
- 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. P. 123701, 8 pages.
- Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M., Dubinskii A.Yu.* Lunar dust and dusty plasmas: Recent developments, advances, and unsolved problems // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 156. P. 71–84.
- Speyerer E.J., Povilaitis R.Z., Robinson M.S., Thomas P.C., Wagner R.V.* Quantifying crater production and regolith overturn on the Moon with temporal imaging // *Nature.* 2016. V. 538. № 7624. P. 215–218.
- Susorney H.C.M., Daly R.T., Barnouin O.S., Stickle A.M., Ernst C.M., Crawford D.A., Cintala M.J.* Effects of Coarse-Grained Targets on Crater Morphology // *Proc. 49th Lunar and Planet. Sci. Conf. The Woodlands, Texas.* 2018, abs. #1119.
- Zhang H.Y., Wang Y., Chen L.P., Zhang H., Li C.H., Zhuang J.H., Li D.T., Wang Y.J., Yang S.S., Li X.Y., Wang W.D.* In-situ lunar dust deposition amount induced by lander landing in Chang'E-3 mission // *Sci. China Tech. Sci.* 2020. V. 63. P. 520–527.