Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 6, с. 379 – 387

Формирование плазменно-пылевых облаков при ударе метеороида о поверхность Луны

С. И. Попель[a,b 1)], *А. П. Голубь*[a], *А. В. Захаров*[a], *Л. М. Зеленый*[a,c], *А. А. Бережной*[d], *Е. С. Зубко*[e], *М. Итен*[f 2)], *Р. Лена*[g 2)], *С. Спозетти*[h 2)], *Ю. И. Великодский*[i], *А. А. Терещенко*[i], *Б. Атаманюк*[j, 2)]

[a]*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия*

[b]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 101000 Москва, Россия*

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

[d]*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, 119234 Москва, Россия*

[e]*Дальневосточный федеральный университет, 690091 Владивосток, Россия*

[f]*Обсерватория Гарден, 6596 Гордола, Швейцария*

[g]*Группа геологических лунных исследований, 00137 Рим, Италия*

[h]*Обсерватория Гноска, 6525 Гноска, Швейцария*

[i]*Национальный авиационный университет, 03058 Киев, Украина*

[j]*Центр космических исследований Польской академии наук, 00-716 Варшава, Польша*

Поступила в редакцию 6 августа 2018 г.
После переработки 17 августа 2018 г.

Рассмотрена природа возникновения двух плазменно-пылевых облаков в результате удара метеороида о поверхность Луны. Показано, что одно из облаков сформировано частицами (или обломками) реголита, выбрасываемого ударной волной метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство, тогда как второе – затвердевшими каплями расплава. Проведены вычисления основных характеристик этих облаков: скоростей расширения облаков, характерных размеров частиц в каждом из облаков, концентраций частиц, их зарядов и т.д. Получено качественное соответствие данным наблюдений, полученных в расчетах скоростей расширения облаков.

DOI: 10.1134/S0370274X18180030

В настоящее время существенное внимание уделяется изучению пыли и пылевой плазмы над Луной [1–8]. В России готовятся миссии "Луна-25", "Луна-26", "Луна-27" и т.д. На посадочных модулях станций "Луна-25" и "Луна-27" предполагается разместить аппаратуру, которая будет исследовать свойства пыли и пылевой плазмы над поверхностью Луны [9–11]. В миссии NASA LADEE ("Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer" – "Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды") [12, 13], запущенной в 2013 г., пылевая плазма изучалась в широком диапазоне высот над Луной с помощью наблюдений с орбиты.

Важным источником пыли над поверхностью Луны являются удары метеороидов, которые приводят к подъему пылевых частиц, в том числе, и на большие высоты (см., например, [14, 15]). Рассмотрение [14, 15] проводилось для ситуации, когда концентрация пылевых частиц над Луной определяется потоком метеороидов, сталкивающихся с поверхностью Луны. Однако единичные удары достаточно крупных метеороидов о Луну также влияют на состояние плазменно-пылевой системы. Влияние единичных ударов больших метеороидов на возможность образования пыли над Луной рассматривалось лишь на уровне оценок [16] в рамках исследования временных атмосфер ("*transient atmospheres*"), образующихся у безатмосферных космических тел, к которым относится и Луна. Соответственно, особенности плазменно-пылевых облаков, формирующихся при ударах о поверхность Луны крупных метеороидов, не обсуждались.

1)e-mail: popel@iki.rssi.ru
2)M. Iten, R. Lena, S. Sposetti, B. Atamaniuk.

Что касается наблюдений, как правило, о соударениях метеороидов с Луной можно судить по кратковременным оптическим вспышкам, сейсмическим волнам и концентрации Na в лунной экзосфере. Непосредственно изучать свойства плазменно-пылевого облака обычно не удается. Однако 26 февраля 2015 г. в 21 ч 35 мин 22.871 с ($\pm$ 0.010 с) UT на затемненной части лунной поверхности вблизи терминатора с помощью 125-миллиметрового рефрактора, расположенного в Гордоле (Gordola), Швейцария и оборудованного видеокамерой Watec 902H2 Ultimate, удалось зафиксировать (М. Итен) оптическую вспышку от удара метеороида. Тот факт, что удар метеороида произошел на затемненной части лунной поверхности вблизи терминатора, указывает на достаточную редкость такого явления. Однако именно этот факт и позволил провести детальные наблюдения эволюции свечения, вызванного ударом. Действительно, в то время, как сама вспышка при ударе метеороида характеризуется тепловым излучением, свечение, наблюдаемое в последующие моменты времени, обусловлено рассеянием солнечного света на пылевых частицах, которые поднимаются над поверхностью Луны в результате удара метеороида. Свечение, связанное с рассеянием солнечного света на пылевых частицах, удается эффективно наблюдать лишь в ситуации, когда удар метеороида происходит на затемненной части Луны вблизи терминатора. Иначе, либо освещенность поверхности Луны мешает наблюдениям, либо солнечный свет не падает на поднимающиеся над Луной пылевые частицы.

Отметим, что в настоящее время в связи с организацией мониторинга оптических вспышек на Луне обнаружено несколько сотен оптических лунных вспышек, вызванных ударами метеороидов [17]. Согласно статистике, можно было бы ожидать наблюдения ударных вспышек и образующихся плазменно-пылевых облаков вблизи лунного терминатора. Однако до сих пор в научной печати описания таких вспышек не проводилось. Таким образом, в данной работе впервые рассматривается явление образования плазменно-пылевых облаков после падения крупного метеороида вблизи лунного терминатора. Такие явления не обсуждались ранее, поэтому требуется срочное исследование параметров образующихся плазменно-пылевых облаков в связи с актуальностью проблемы и возможностью наблюдения аналогичных событий в ближайшем будущем.

На рисунке 1 представлены фотографии области, в которой произошла вспышка, в следующие моменты времени: 0.25 с до вспышки; 4, 8, 12, 16 и 20 с после вспышки. Из рисунка 1 видно, что область свечения,

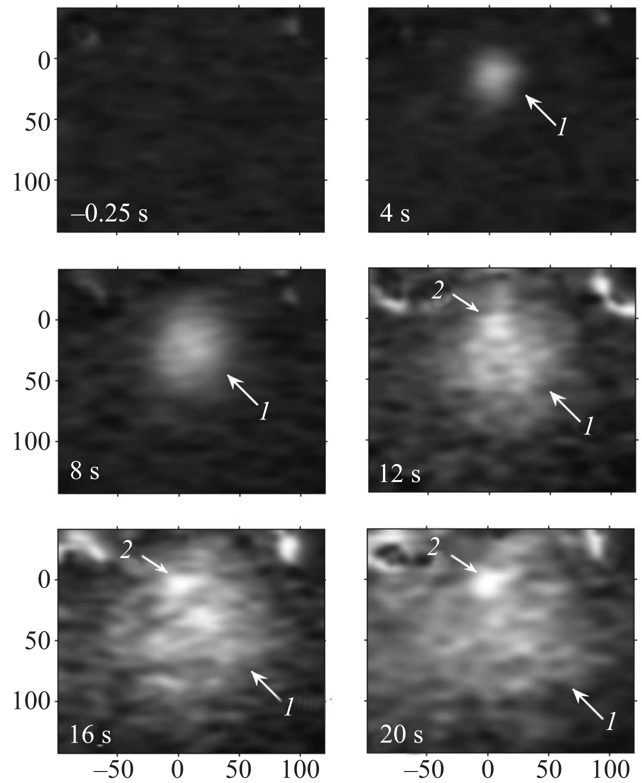

Рис. 1. Фотографии области, в которой произошло соударение метеороида с лунной поверхностью, сделанные за 0.25 с до соударения, а также через 4, 8, 12, 16 и 20 с после соударения. Координаты (0, 0) характеризуют точку удара метеороида. Расстояния по осям вычисляются в километрах. Выделены большое быстрое облако пыли (*1*) и малое медленное облако (*2*)

образованная в результате удара метеороида, расширяется. Картина свечения, представленная на рис. 1, связана с распределением пыли над поверхностью Луны после столкновения с ней метеороида, и фактически по фотографиям, сделанным после вспышки, можно судить о поведении пыли над Луной. Видна следующая особенность распределения пыли. На всех пяти фотографиях, сделанных после вспышки, присутствует расширяющееся большое облако. Начиная с 12-й секунды, явным также становится существование малого (медленного) облака, которое проявляется как светлое пятно в точке (0, 0). На 20-й секунде по яркости оно уже доминирует.

Целью приведенных ниже вычислений является выявление механизма, объясняющего возникновение двух плазменно-пылевых облаков в результате удара достаточно крупного метеороида о поверхность Луны, а также оценки характеристик этих плазменно-пылевых облаков. Оценки, выполненные на основе метода [18] для вычисления кинетической энергии ударника по максимальной яркости вспышки, позволяют определить диапазон возможных кинетических энергий метеороида от $6\cdot10^8$ Дж до $1.7\cdot10^9$ Дж. Расчеты проводятся для массы ударника $m_i = 4.7$ кг и его скорости $u_i = 27$ км/с, что соответствует верхней границе ($1.7\cdot10^9$ Дж) данного диапазона возможных кинетических энергий. При использовании характеристик метеороида, соответствующих нижней границе этого диапазона, как выяснилось, не удается объяснить факт наблюдения двух (большого быстрого и малого медленного) плазменно-пылевых облаков, что указывает на необходимость рассмотрения достаточно крупного и высокоскоростного метеороида с кинетической энергией, существенно превосходящей $6\cdot10^8$ Дж.

Используемые параметры позволяют применять предположение [15], согласно которому удельная энергия ударника $u_i^2/2$ значительно превосходит имеющую обычно порядок 10 МДж/кг 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, стекол, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т. д.). В этом случае при соударении 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 метеороидного взрыва. 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 соударения соответственно равны $\rho_{i0} = 3$ г/см^3 и $\rho_{t0} = 1.4$ г/см^3. Соответственно, радиус ударника $a_i = 7.2$ см. 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, $C_i = 7.71$ км/с, $S_i = 1.05$, $C_t = C_ik/(1 + S_i(k - 1)) = 7.51$ км/с, $S_t = S_ik/(1 + S_i(k - 1)) = 1.02$. Скорость ударной волны и массовая скорость однозначно определяют уравнение состояния через хорошо известные уравнения Гюгонио. Линейная зависимость между указанными скоростями обычно достаточно хорошо описывает экспериментальные данные (см. [19]).

Для нахождения распределения по размерам пылевых частиц в лунном реголите использовались данные [20] в диапазоне размеров частиц пыли от 20 до 500 мкм. Эти данные позволяют построить распределение пылевых частиц в лунном реголите, находящееся в хорошем согласии с распределением Колмогорова [4], которое определяет вероятность $\Phi(L)$ обнаружить частицу лунного реголита с радиусом (характерным размером), меньшим L, для случая многократного дробления. Указанный факт согласуется с выводами [20] о том, что лунная поверхность представляет собой реголит, эволюционирующий в результате многократного дробления в результате ударов метеороидов. Данное распределение Колмогорова используется в дальнейших расчетах.

В результате рассматриваемого удара достаточно крупного высокоскоростного метеороида о лунную поверхность вокруг эквивалентного центра метеороидного взрыва, расположенного на глубине

$$W_0 = \frac{2a_i\rho_{i0}\cos\theta}{\rho_{t0}} \tag{1}$$

под поверхностью (где θ – угол между направлением падения метеороида и вертикалью к лунной поверхности), формируются зоны (ср. с [14, 15]), 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. За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная. Границы зон представляют собой части сфер, центр которых совпадает с эквивалентным центром метеороидного взрыва. В рассматриваемой ситуации, а также при условии, что скорость звука в невозмущенном реголите равна $c_0 = 300$ м/с, радиусы внешних границ I, II, III и IV зон под лунной поверхностью оказываются приблизительно равными: $r_{\mathrm{I}} \approx 0.31u_i^{2/3}a_i$, $r_{\mathrm{II}} \approx 0.58u_i^{2/3}a_i$, $r_{\mathrm{III}} \approx 0.93u_i^{2/3}a_i$, $r_{\mathrm{IV}} \approx 1.3u_i^{2/3}a_i$, где скорость u_i вычисляется в км/с. Полагая, что радиус ударника $a_i = 7.2$ см, а его скорость $u_i = 27$ км/с, находим $r_{\mathrm{I}} = 20.1$ см, $r_{\mathrm{II}} = 37.6$ см, $r_{\mathrm{III}} = 60.3$ см, $r_{\mathrm{IV}} = 84.3$ см.

Зоны III–V являются источником пылевых частиц, представляющих собой частицы реголита или их обломки, над поверхностью Луны. При этом большая часть пыли, покидающей поверхность Луны вследствие ударов метеороидов, происходит из зоны

V линейных упругих деформаций вещества реголита. Действительно, масса пылевых частиц из зоны V, 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) [15]. Зоны I–II являются источником испаренного и расплавленного вещества ударника и реголита. Материал, выбрасываемый ударной волной в свободное пространство из зоны плавления вещества (II), представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты. Образуются жидкие капли вещества, которые, в итоге, затвердевают и поднимаются на высоты порядка 100 км и выше [15]. Поднимаясь над поверхностью Луны, как частицы (или обломки) реголита, так и капли расплава в результате взаимодействия, в частности, с электронами и ионами солнечного ветра, а также солнечным излучением, приобретают электрические заряды. В результате образуются два плазменно-пылевых облака: одно, сформированное частицами (или обломками) реголита; второе, сформированное затвердевшими каплями расплава. Эти облака имеют различные характеристики, например, скорость расширения, что и позволяет наблюдать их по отдельности.

Вычисления скорости и количества вещества, поднимающегося над поверхностью Луны, оказываются возможными для зоны V линейных упругих деформаций вещества реголита и зоны плавления вещества (II). Фактически, из-за того, что большая часть пылевых частиц, покидающих поверхность Луны вследствие ударов метеороидов, происходит из зоны V, этих вычислений достаточно для выявления основных характеристик плазменно-пылевых облаков.

В зоне линейных упругих деформаций вещества реголита (V) фрагменты лунной породы, находящиеся в приповерхностном слое глубиной (так называемом откольном слое [15])

$$w = w_c = 0.5 c_0 \tau_+, \qquad \text{если} \quad r > r_{\mathrm{IV}}, \tag{2}$$

отделяются от лунной поверхности в результате взаимодействия с волной сжатия. Здесь τ_+ – время положительной фазы ($u_r > 0$) в ударной волне, u_r – горизонтальная компонента массовой скорости в ударной волне. В зонах I–IV для определения глубины откольного слоя используется линейная интерполяция:

$$w(r) = W_0 + \frac{w_c - W_0}{r_{\mathrm{IV}}} r, \qquad \text{если} \quad r \leq r_{\mathrm{IV}}. \tag{3}$$

При $a_i = 7.2$ см и $u_i = 27$ км/с, глубина откольного слоя в зоне V равна $w_c = 38.9$ см. При распространении ударной волны вдоль лунной поверхности вдали от эпицентра метеороидного взрыва в приповерхностном слое формируется волна разрежения и появляется вертикальная компонента u_z массовой скорости за фронтом ударной волны. При $r > r_{\mathrm{IV}}$ имеем $u_r = (1 - 1.5) u_z$ [21]. Вычисления проводились при $u_r = u_z$ (ср. с [14, 15]). Исходя из выражений для глубины откольного слоя w и распределения частиц реголита по размерам на поверхности Луны, можно найти количество и характерные размеры пылевых частиц, поднимающихся в единицу времени над лунной поверхностью вследствие удара метеороида.

Что касается зоны плавления вещества (II), материал, выбрасываемый из нее ударной волной в свободное пространство, представляет собой жидкость, распадающуюся на фрагменты. Равновесные капли образуются, когда в капельно-паровом потоке объем, занимаемый паром, становится сопоставимым с объемом жидкости [15]. Равновесное значение радиуса капли (при $t \to \infty$), образованной (вследствие удара метеороида) в зоне плавления вещества (II), имеет вид [22]:

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

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой капли (для силикатных частиц обычно $\sigma \sim \sim 0.3\ \mathrm{Н} \cdot \mathrm{м}^{-1}$), C_D – коэффициент сопротивления при движении капли в паровом потоке, ρ_d – плотность вещества капли, a – модуль вектора ускорения, $\mathbf{a} = = -(1/\rho) \boldsymbol{\nabla} P$, ρ – плотность капельно-паровой смеси, $\boldsymbol{\nabla} P$ – градиент давления P.

Вычисляя градиент давления для параметров ударной волны, образованной в результате удара метеороида, полагая $C_D = 1$ (см. [22]), $\rho_d = 3\ \mathrm{г/см}^3$, $\sigma = 0.3\ \mathrm{Н} \cdot \mathrm{м}^{-1}$, а также учитывая, что большинство из капель расплава поднимаются из части зоны II, близкой ко внешней границе этой зоны, находим характерный радиус капли:

$$a_{dr} \approx 1.5 \cdot 10^{-4} a_i^{1/2}, \tag{5}$$

где a_{dr} и a_i вычисляются в сантиметрах. При $a_i = 7.2$ см находим $a_{dr} \approx 4$ мкм.

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, капли, имеющие происхождение из зоны плавления вещества (II), выбрасываются ударной волной метеороидного взрыва с поверхности Луны с большой скоростью (1.5–6 км/с) и поднимаются на большую высоту. Частицы реголита или их обломки из зон III–V имеют характерные размеры порядка 10–100 мкм (максимум распределения по размерам находится в области 50–70 мкм) и поднимаются со скоростями, меньшими чем капли, на меньшие высоты.

Поведение пылевой частицы над Луной описывается уравнениями, описывающими ее динамику и зарядку [9]:

$$m_d \frac{d^2h}{dt^2} = q_d E - m_d g_M, \tag{6}$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \tag{7}$$

где h – высота над лунной поверхностью; m_d – масса пылевой частицы; q_d – ее заряд; E – напряженность электрического поля; g_M – ускорение свободного падения у поверхности Луны; $I_e(q_d)$ и $I_i(q_d)$ – микроскопические токи на пылевую частицу электронов и ионов солнечного ветра, $I_{ph}(q_d)$ – фототок электронов с пылевой частицы, обусловленный ее взаимодействием с солнечным излучением, $I_{e,ph}(q_d)$ – ток фотоэлектронов на пылевую частицу:

$$I_e \approx -\pi a^2 e n_{eS} \sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{eS}}\right), \tag{8}$$

$$\begin{aligned} I_i \approx{}& \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_{iS}} \times \\ &\times \left\{ \frac{u_{iS}+u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_{iS}-u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) + \right. \\ &\left. + \frac{u_{iS}-u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_{iS}+u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) \right\} + \\ &+ \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{4m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_{iS}} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{u_{iS}+u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) + \right. \\ &\left. + \operatorname{erf}\left(\frac{u_{iS}-u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) \right\} \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{a T_{iS}} + \frac{u_{iS}^2}{u_{Ti}^2}\right), \end{aligned} \tag{9}$$

$$I_{ph} \approx -\pi a^2 e N_0 \sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right) \exp\left(-\frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right), \tag{10}$$

$$I_{e,ph} \approx -\pi a^2 e n_{e,ph} \sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right). \tag{11}$$

Выражения (8)–(11) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Здесь a – размер пылевой частицы, Z_d – ее зарядовое число ($q_d = Z_d e$), e – элементарный заряд, $n_{e(i)S}$ – концентрация электронов (ионов) солнечного ветра, $T_{e(i)S}$ – температура электронов (ионов) солнечного ветра, $m_{e(i)}$ – масса электрона (иона), $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2/am_i}$, $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS}/m_i}$ – тепловая скорость ионов солнечного ветра, u_{iS} – скорость солнечного ветра, $n_{e,ph}$ ($T_{e,ph}$) – концентрация (температура) фотоэлектронов с поверхностей пылевых частиц (учитывается тот факт, что пылевые частицы находятся над темной частью Луны, но при этом освещаются солнечным светом). Выражение (10) для тока I_{ph} не содержит множителя, содержащего характеристики спектров излучения, что оказывается возможным в ситуации, когда поверхности пылевых частиц и поверхность Луны имеют одинаковые фотоэлектрические свойства (работу выхода и квантовый выход). В этой ситуации указанный множитель удается выразить через значение N_0 концентрации фотоэлектронов от поверхности освещенной части Луны при $h \to 0$, зависящее от работы выхода и квантового выхода материала лунного грунта [10].

Ниже приводятся результаты вычислений для высот, больших 100 м над поверхностью Луны. В данной ситуации влиянием на пылевую частицу электрических полей как от заряженной поверхности Луны, так и от соседних пылевых частиц (ввиду их разреженности) можно пренебречь. При этом пылевые частицы успевают приобрести существенные заряды за достаточно малые времена. При вычислении зарядов частиц на высотах, больших 100 м, основными токами, влияющими на их величину, являются микроскопический ток электронов солнечного ветра, а также фототок электронов с пылевой частицы, обусловленный ее взаимодействием с солнечным излучением. Значения этих токов фактически не зависят от высоты над поверхностью Луны. Поэтому полученные величины зарядов для частиц одного размера оказываются одинаковыми на различных высотах. Для значений работы выхода $W = 6$ эВ и квантового выхода из [23], являющегося результатом экспериментального исследования, выполненного на образцах лунной пыли, доставленных на Землю в миссиях Аполлон-14 и 15, типичные значения $N_0 = 2.9 \cdot 10^2$ см$^{-3}$ и $T_{e,ph} = 1.9$ эВ [10]. Для этих значений, а также для следующих параметров солнечного ветра: $n_{eS} = n_{iS} = 8.7$ см$^{-3}$, $T_{eS} = 12$ эВ, $T_{iS} = 6$ эВ, $u_{iS} = 468 \cdot 10^5$ см/с значения зарядовых чисел частиц в облаке, сформированном частицами (или обломками) реголита, достигают величин

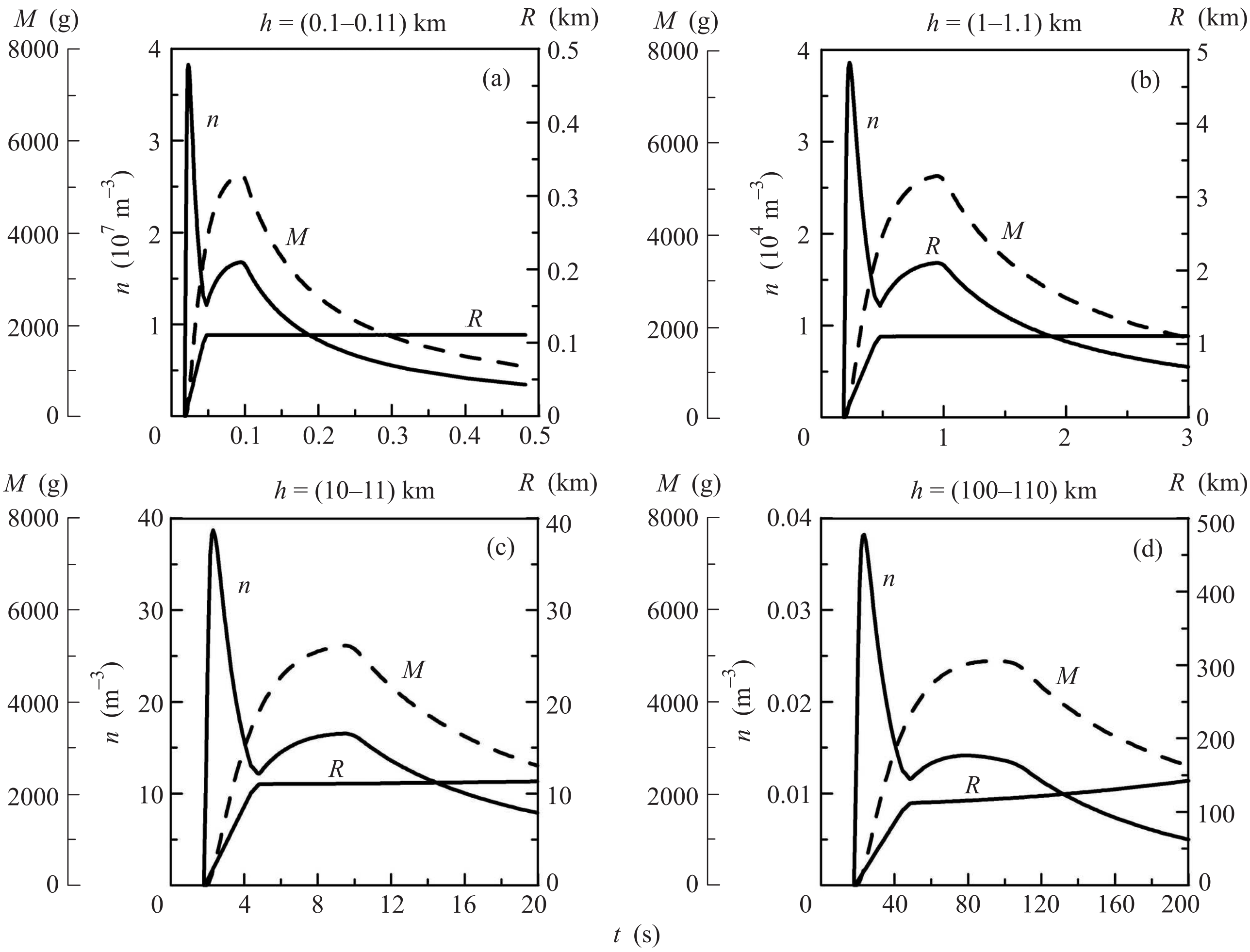

Рис. 2. Динамика слоев плазменно-пылевого облака, сформированного затвердевшими каплями расплава: (a) – $h = (0.1{-}0.11)$ км; (b) – $h = (1{-}1.1)$ км; (c) – $h = (10{-}11)$ км; (d) – $h = (100{-}110)$ км. Кривые описывают зависимости от времени радиуса слоя R, характеризующего размер слоя в направлении, параллельном подверженной метеороидному удару поверхности; суммарной массы пылевых частиц в слое M; средней по объему слоя концентрации пылевых частиц n

$Z_d \sim 2 \cdot 10^5$ (для $a \approx 70$ мкм) за время порядка 0.5 с, тогда как частицы в облаке, сформированном затвердевшими каплями расплава, приобретают заряды, характеризуемые $Z_d \sim 1 \cdot 10^4$, за время порядка 10 с. Времена зарядки пылевых частиц существенно меньше времен эволюции этих облаков. Таким образом, в рассматриваемой ситуации фактически наблюдается процесс расширения облаков заряженных пылевых частиц.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты, характеризующие динамику различных пылевых слоев соответственно для плазменно-пылевого облака, сформированного затвердевшими каплями расплава, и облака, образованного частицами (или обломками) реголита.

Отметим, что ударной волной метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство выбрасывается расплав, масса которого на два порядка величины меньше массы выбрасываемых частиц реголита. При этом число капель (каждая из которых имеет размер, составляющий несколько микрометров), на которые распадается расплав, на порядки величины больше числа выбрасываемых крупных (размером в десятки микрометров) частиц реголита. Таким образом, рассматриваемые плазменно-пылевые облака довольно сильно отличаются друг от друга. Если смотреть на эти облака сверху (что и происходило при их наблюдении), то наблюдается расширение облаков в горизонтальной плоскости. На рисунках 4 и 5, соответственно, для плазменно-пылевого облака, сформированного затвердевшими каплями расплава, и облака, образованного частицами (или обломками) реголита, представлены результаты расчетов зависимостей от времени радиуса

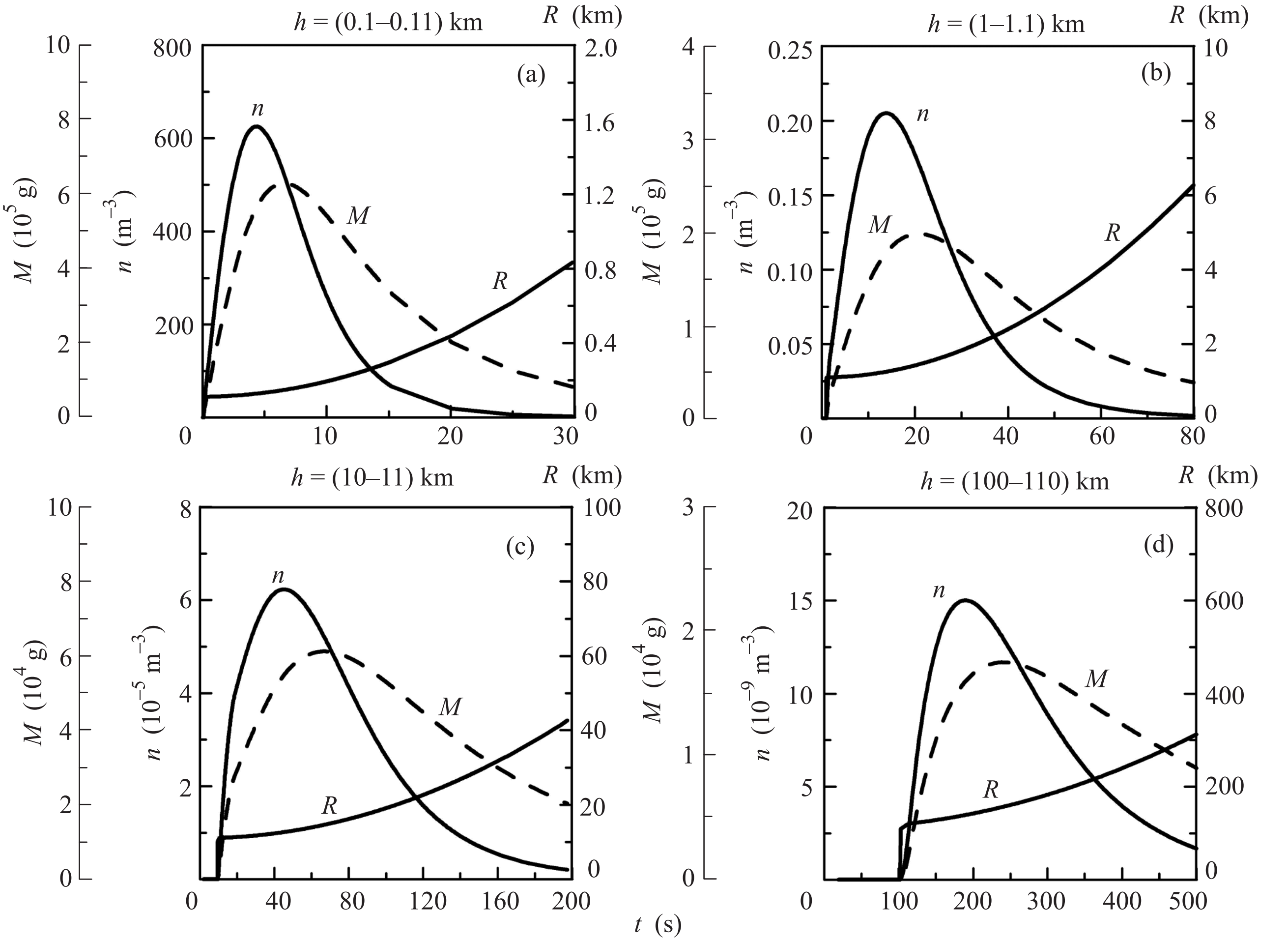

Рис. 3. Динамика слоев плазменно-пылевого облака, сформированного частицами (или обломками) реголита: (a) – $h = (0.1{-}0.11)$ км; (b) – $h = (1{-}1.1)$ км; (c) – $h = (10{-}11)$ км,; (d) – $h = (100{-}110)$ км. Кривые описывают зависимости от времени радиуса слоя R, характеризующего размер слоя в направлении, параллельном подверженной метеороидному удару поверхности; суммарной массы пылевых частиц в слое M; средней по объему слоя концентрации пылевых частиц n

облака R, характеризующего его границу в горизонтальной плоскости, высоты $H(R)$ над лунной поверхностью этой границы, а также концентрации $n(R)$ пылевых частиц на этой границе. Данные, представленные на рис. 4, 5, позволяют определить скорости расширения пылевых облаков dR/dt. Оказывается, что скорость расширения облака, сформированного затвердевшими каплями расплава, составляет примерно 2 км/с, тогда как скорость расширения облака, сформированного частицами (или обломками) реголита, составляет примерно 1 км/с, т.е. можно говорить о существенно (в разы) более быстром расширении облака затвердевших капель по сравнению с облаком частиц реголита. Данный факт соответствует данным наблюдений, представленным на рис. 1, согласно которым скорость расширения быстрого облака составляет несколько км/с, тогда как скорость расширения медленного облака скорее всего не превышает 1 км/с.

Вычисления, аналогичные проведенным в данной работе, но для минимальной (из диапазона возможных кинетических энергий метеороида) энергии $6 \cdot 10^8$ Дж приводят к достаточно близким скоростям расширения обоих облаков, что препятствует наблюдению двух (большого быстрого и малого медленного) плазменно-пылевых облаков. Таким образом, по всей видимости, событие 26 февраля 2015 г. было вызвано достаточно крупным и высокоскоростным метеороидом. Отметим также, что в рамках представленной теоретической модели и рассмотренных параметров, характеризующих вещество метеороида и лунного грунта, при скорости метеороидного удара, меньшей 7.5 км/с, ударной волной с лунной поверхности выбрасывается лишь материал в нерасплав-

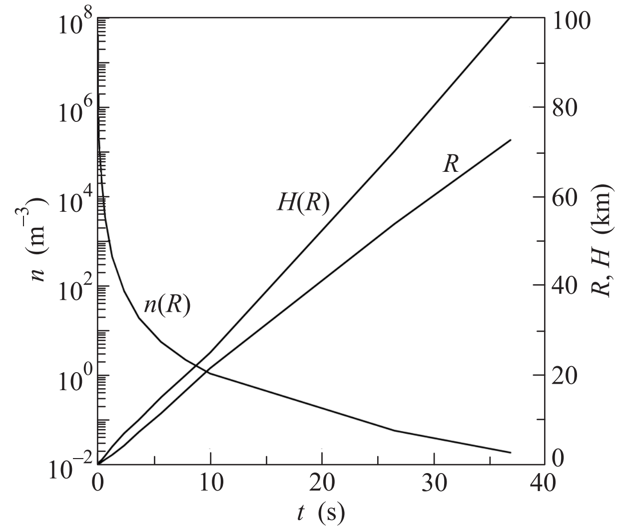

Рис. 4. Временные зависимости радиуса R облака, сформированного затвердевшими каплями расплава, высоты $H(R)$ над лунной поверхностью границы этого облака, а также концентрации $n(R)$ пылевых частиц на границе облака

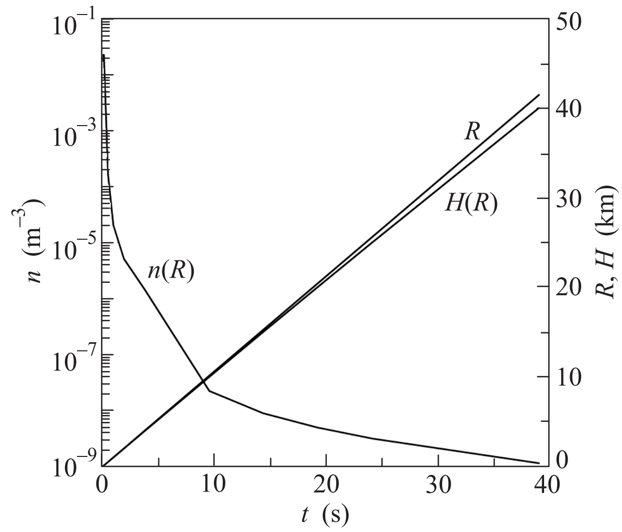

Рис. 5. Временные зависимости радиуса R облака, сформированного частицами (или обломками) реголита, высоты $H(R)$ над лунной поверхностью границы этого облака, а также концентрации $n(R)$ пылевых частиц на границе облака

ленном состоянии. В этом случае возникает только одно облако, состоящее из частиц реголита.

Отметим также асимметрию (относительно точки $(0,0)$), которая возникает при распространении облака пыли (см. рис. 1). Асимметрия связана с наклоном по отношению к горизонту лунной поверхности. Если удар метеороида приходится на лунную поверхность, расположенную под углом α к горизонту, то образующееся пылевое облако разлетается в горизонтальном направлении не симметрично относительно точки удара. В этом случае, наблюдая за облаком сверху, можно выделить максимальное $R_{\max}$ и минимальное $R_{\min}$ расстояния от точки удара до границы облака. Если R – граница пылевого облака при ударе метеороида о горизонтальную поверхность, а $H(R)$ – высота этой границы над лунной поверхностью (см. рис. 4, 5), то имеют место соотношения:

$$R_{\max} = H(R)\sin\alpha + R\cos\alpha,$$
$$R_{\min} = H(R)\sin\alpha - R\cos\alpha. \qquad (12)$$

В вычислениях фактор асимметрии не учитывался, что связано с отсутствием информации о рельефе лунной поверхности в возмущенной ударом метеороида области. На самом деле, поверхность Луны может иметь впадины и возвышенности. Таким образом, возникает большая неопределенность в том, под каким углом к горизонту выбрасывается материал. Поэтому от сравнения результатов вычислений с данными наблюдений не следует ожидать детальных количественных совпадений.

Итак, представлен механизм, объясняющий явление возникновения двух плазменно-пылевых облаков в результате удара метеороида о поверхность Луны, наблюдавшееся 26 февраля 2015 г., а также проведены вычисления основных характеристик этих облаков. Оказывается, что ударной волной метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство выбрасываются частицы (или обломки) лунного реголита, а также расплав. Поднимаясь над поверхностью Луны, как частицы (или обломки) реголита, так и капли расплава в результате взаимодействия, в частности, с электронами солнечного ветра, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды. В результате образуются два плазменно-пылевых облака: одно, сформированное частицами (или обломками) реголита; второе, сформированное затвердевшими каплями расплава. Эти облака имеют различные характеристики (скорости расширения облаков, суммарную массу частиц в облаках, характерные размеры частиц в каждом из облаков, концентрации частиц, их заряды и т.д.), что и позволяет наблюдать облака по отдельности. Получено качественное соответствие данным наблюдений полученных в расчетах скоростей расширения облаков. Показано, что событие, наблюдавшееся 26 февраля 2015 г., было, скорее всего, вызвано достаточно крупным и высокоскоростным метеороидом с характеристиками, соответствующими верхней части диапазона возможных кинетических энергий метеороида, полученного на основе метода для вычисления кинетической энергии ударника по максимальной яркости вспышки. События типа того, которое произошло 26 февраля 2015 г., существенным образом изменяют свойства плазменно-пылевой системы над Луной. В частности, в экзосфере Луны за счет выброса в нее частиц (или обломков) лунного реголита появляется ощутимое количество пылевых частиц с размерами порядка 10–100 мкм, число которых в экзосфере обычно невелико [14].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект # 17-12-01458).

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. 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).
6. Т. М. Буринская, Физика плазмы **40**, 17 (2014).
7. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and B. Atamaniuk, Phys. Plasmas **22**, 123701 (2015).
8. S. I. Popel, A. P. Golub', L. M. Zelenyi, and A. Yu. Dubinskii, Planet. Space Sci. **156**, 71 (2018).
9. 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).
10. 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).
11. I. A. Kuznetsov, S. L. G. Hess, A. V. Zakharov, F. Cipriani, E. Seran, S. I. Popel, E. A. Lisin, O. F. Petrov, G. G. Dolnikov, A. N. Lyash, and S. I. Kopnin, Planet. Space Sci. **156**, 62 (2018).
12. 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).
13. M. Horányi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grün, R. Srama, and Z. Sternovsky, Nature **522**, 324 (2015).
14. 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).
15. С. И. Попель, А. П. Голубь, Л. М. Зеленый, М. Хораньи, Письма в ЖЭТФ **105**, 635 (2017).
16. I. V. Nemtchinov, V. V. Shuvalov, N. A. Artemieva, I. B. Kosarev, and S. I. Popel, Int. J. Impact Eng. **27**, 521 (2002).
17. https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/lunar/lunar_impacts.html
18. J. L. Ortiz, J. M. Madiedo, N. Morales, P. Santos-Sanz, and F. J. Aceituno, MNRAS **454**, 344 (2015).
19. Г. Мелош, *Образование ударных кратеров*, Мир, М. (1994).
20. J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, and S. Sture, Rev. Geophys. **45**, RG2006 (2007).
21. В. В. Адушкин, А. А. Спивак, *Подземные взрывы*, Наука, М. (2007).
22. H. J. Melosh and A. M. Vickery, Nature **350**, 494 (1991).
23. R. F. Willis, M. Anderegg, B. Feuerbacher, and B. Fitton, in *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*, ed. by R. J. L. Grard, D. Reidel, Dordrecht (1973), p. 389.