

## Плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны

А. П. Голубь, Г. Г. Дольников<sup>+</sup>, А. В. Захаров<sup>+</sup>, Л. М. Зеленый<sup>+</sup>, Ю. Н. Извекова, С. И. Копнин, С. И. Попель

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 11 января 2012 г.

После переработки 23 января 2012 г.

Рассмотрена плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны. Найдены максимальные высоты подъема пыли. Показано отсутствие мертвой зоны в области лунных широт около  $80^\circ$ , в которой частицы пыли не могут подниматься над поверхностью Луны. Определены распределения пыли по размерам и высотам.

В настоящее время наблюдается определенный ренессанс в области исследований Луны. О своих планах исследования Луны в XXI веке заявили КНР, США, Индия, Европейский Союз. В России готовятся миссии Луна-Глоб и Луна-Ресурс (последняя совместно с Индией). Немаловажная роль в будущих лунных исследованиях принадлежит исследованиям пыли у поверхности Луны. Для этого на станциях Луна-Глоб и Луна-Ресурс предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения. На рис. 1 представлена схема расположения

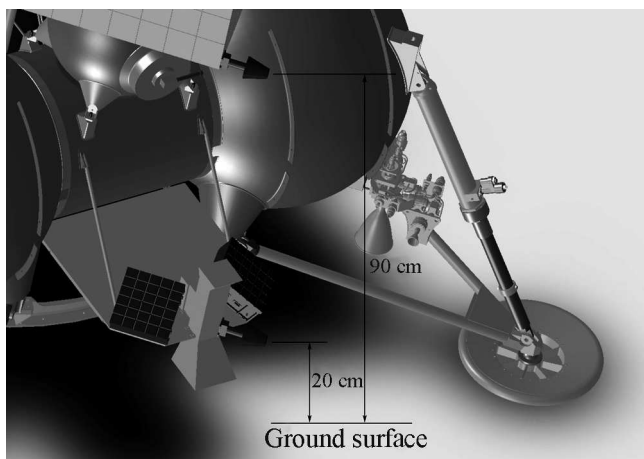


Рис. 1. Схема расположения датчиков (на высотах 20 и 90 см над поверхностью Луны), детектирующих частицы пыли, на станциях Луна-Глоб и Луна-Ресурс

датчиков (на высотах 20 и 90 см над поверхностью Луны), детектирующих частицы пыли, на станциях Луна-Глоб и Луна-Ресурс. Оптические наблюдения пыли будут осуществляться на высотах, не превы-

шающих нескольких метров. Измерения предполагается проводить в дневное время, что позволит обеспечить энергопитание приборов на лунных станциях за счет солнечной энергии.

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. 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 взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли. Считается [1], что мелкие пылевые частицы (с размерами, меньшими нескольких мкм), отталкиваясь от поверхности, могут подниматься вверх до высот от нескольких метров до километров над поверхностью Луны. Таким образом, пыль над Луной является составной частью плазменно-пылевой системы, исследования которой в приповерхностном слое освещенной части лунной поверхности представляют существенный интерес, в том числе с технологической точки зрения, для устанавливаемой на лунных станциях аппаратуры, выбора места посадки и т.д.

Следует отметить, что в работе [1], в которой, в частности, вычислялись максимальные высоты подъема пылевых частиц над поверхностью Луны, указано на существование мертвой зоны (в области лунных широт около  $80^\circ$ ), где частицы не поднимаются. Именно указанная область широт представ-

ляет интерес, поскольку, по-видимому, прилунение станций Луна-Глоб и Луна-Ресурс будет осуществляться вблизи полярных областей Луны. Предсказание наличия мертвой зоны обусловлено тем, что в [1] не учитывалось влияние фотоэлектронов.

Недавние исследования [2] по детектированию потоков нейтронов, прошедших через участки лунной поверхности в южном полушарии Луны, проведенные Lunar Reconnaissance Orbiter, показали присутствие в приповерхностной зоне Луны в области широт, превышающих  $70^\circ$ , областей, обогащенных водородом. Возможно, исследование [2] указывает на присутствие льда в приповерхностных областях Луны, а возможно, существование приповерхностных областей водорода обусловлено электронами и протонами солнечного ветра, которые, ударяясь о Луну, поглощаются ее поверхностью, где они образуют нейтральные атомы водорода. Данный водород может выходить на поверхность Луны в виде атомарного либо молекулярного водорода или водяного пара [3]. При этом чувствительность участков поверхности Луны, обогащенных водородом, к фотоэмиссии оказывается значительно выше, чем у окружающих участков, что в конечном итоге сказывается и на процессе зарядки пылевых частиц и их динамике.

Данных о приповерхностной концентрации пыли на Луне практически нет. Имеющиеся работы описывают концентрации пыли либо на основе заведомо неприменимой для описания приповерхностного плазменно-пылевого слоя модели, в которой не учитываются фотоэлектроны [4], либо на основе анализа наблюдаемого рассеяния света пылью в миссии Аполлона 15 [5]. При этом в [5] характерный масштаб высот, на которых оцениваются концентрации пыли, составляет километры.

В настоящей работе на основе рассмотрения движения единичных заряженных пылевых частиц изучается плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны. Исследуются ситуации, когда пылевая плазма образуется над участками лунного реголита, а также над участками лунной поверхности, обогащенными водородом. Обсуждается вопрос о существовании мертвой зоны в области лунных широт около  $80^\circ$ , в которой, как предполагалось в [1], частицы пыли не могут подниматься над поверхностью Луны. Вычисляются концентрации пыли над поверхностью Луны.

Для описания плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Луны мы используем модель, в которой зарядка пылевых частиц над поверхностью Луны рассчитывается с учетом влияния фотоэлектронов, электронов и ионов

солнечного ветра, солнечного излучения. Эффектами взаимодействия пылевых частиц с плазмой хвоста магнитосферы Земли мы пренебрегаем, поскольку указанное взаимодействие является существенным лишь для теневой стороны Луны. Наклон оси Луны относительно плоскости эклиптики составляет всего  $1.5424^\circ$ , что определяет достаточно небольшое отличие лунной широты от угла  $\theta$  между местной нормалью и направлением на Солнце. Поэтому вычисления проводятся в терминах угла  $\theta$ .

Для нахождения концентраций фотоэлектронов и электрических полей над поверхностью Луны применяется модель [3]. Она сводится к решению системы уравнений, состоящей из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение потенциала у лунной поверхности и на бесконечном удалении от нее. Функция распределения фотоэлектронов у лунной поверхности находится с помощью метода, развитого в работе [6]. Согласно этому методу с использованием данных о спектре излучения Солнца [7, 8], а также квантовом выходе фотоэмиссии [3] вычисляется количество электронов у поверхности Луны, выбиваемых фотонами с лунной поверхности в результате фотоэффекта. Полученное распределение (по скоростям) фотоэлектронов у поверхности Луны удается аппроксимировать максвелловским распределением, характеризующимся температурой фотоэлектронов  $T_{e,ph}$  и их концентрацией  $N_0$  для двух рассматриваемых значений работы выхода фотоэмиссии:  $W = W_H \approx 4$  эВ и  $W = W_R \approx 9$  эВ. Первое из значений  $W$  соответствует участкам лунной поверхности, обогащенным водородом, а второе – участкам лунного реголита. В результате находим, что в обоих случаях  $T_{e,ph} \approx 0.1$  эВ. При этом в первом случае  $N_0 \approx 2 \cdot 10^8$  см $^{-3}$  (что совпадает с данными [3]), а во втором  $N_0 \approx 2 \cdot 10^5$  см $^{-3}$ . Совместное решение кинетического уравнения и уравнения Пуассона позволяет в конечном итоге определить концентрации фотоэлектронов  $n_{e,ph}$  и электрическое поле  $E$  в зависимости от высоты  $h$  над лунной поверхностью, которые имеют вид (ср. с [9])

$$n_{e,ph}(h, \theta) = N_0 \frac{\cos \theta}{[1 + \sqrt{\cos \theta / 2} (h / \lambda_D)]^2}, \quad (1)$$

$$E(h, \theta) = \frac{2T_{e,ph}}{e} \frac{\sqrt{\cos \theta / 2}}{\lambda_D + h \sqrt{\cos \theta / 2}},$$

где  $-e$  – заряд электрона,  $\lambda_D = \sqrt{T_{e,ph} / 4\pi N_0 e^2}$  – дебаевский радиус. Анализ первого из выражений

(1) показывает, что для углов  $\theta$ , не слишком близких к  $\pi/2$ , концентрации (а также потоки) фотоэлектронов и электронов солнечного ветра сравниваются на высотах порядка 1 м. Это подтверждает необходимость одновременного рассмотрения частиц солнечного ветра и фотоэлектронов при изучении приповерхностного слоя. Отметим, что при выводе выражений (1) предполагалось, что имеет место квазинейтральность солнечного ветра (см., например, [6]). Отклонения от квазинейтральности в солнечном ветре, вызванные тем, что движение электронов солнечного ветра гораздо больше подвержено воздействию электрического поля (1), чем движение ионов, оказываются возможными (для углов  $\theta$ , не слишком близких к  $\pi/2$ ) на высотах  $h > h_{\max} \sim (u_i/v_{T_{e,ph}})^2 \lambda_{DS}$ , где  $u_i$  – скорость солнечного ветра,  $v_{T_{e,ph}} = \sqrt{T_{e,ph}/m_e}$  – тепловая скорость фотоэлектронов,  $m_e$  – масса электрона,  $\lambda_{DS} = \sqrt{T_{eS}/4\pi n_{eS} e^2}$  – дебаевский радиус электронов в солнечном ветре,  $T_{eS}$  ( $n_{eS}$ ) – температура (концентрация) электронов солнечного ветра. Таким образом, для применимости формул (1) высота  $h$  не должна превышать нескольких десятков метров. При этом на высотах в несколько десятков метров (и выше) значения, определяемые формулами (1), очень малы и не превышают уровня флуктуаций. Отметим также зависимости концентрации фотоэлектронов  $n_{e,ph}$  и электрического поля  $E$  от  $\cos\theta$ , обусловленные различными значениями интенсивности потока поглощаемого поверхностью Луны (и, соответственно, приводящего к фотоэффекту) солнечного излучения для различных углов  $\theta$ .

Поведение пылевых частиц в приповерхностном слое описывается уравнениями, выражающими их динамику и зарядку:

$$m_d \frac{d^2 h}{dt^2} = q_d E(h, \theta) - m_d g_M h, \quad (2)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \quad (3)$$

где  $m_d$  – масса пылевой частицы,  $q_d = Z_d e$  – ее заряд,  $Z_d$  – зарядовое число,  $g_M$  – 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. При этом

$$I_e = -\pi a^2 e n_{eS} \sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{eS}}\right), \quad (4)$$

$$I_i = \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left\{ \frac{u_i + u_0}{u_{Ti}} \exp\left[-\frac{(u_i - u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{u_i - u_0}{u_{Ti}} \exp\left[-\frac{(u_i + u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right] \right\} +$$

$$+ \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{4m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{u_i + u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{u_i - u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right) \right] \times$$

$$\times \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{a T_{iS}} + \frac{u_i^2}{u_{Ti}^2}\right), \quad (5)$$

$$I_{ph} = -\pi a^2 e N_0 \sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right) \exp\left(-\frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right), \quad (6)$$

$$I_{e,ph} = -\pi a^2 e N_0 \sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}} \times$$

$$\times \frac{\cos\theta}{[1 + \sqrt{\cos\theta/2}(h/\lambda_D)]^2} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{ph,e}}\right), \quad (7)$$

где  $a$  – размер пылевой частицы,  $n_{iS}$  – концентрация ионов солнечного ветра,  $T_{iS}$  – температура ионов солнечного ветра,  $m_i$  – масса иона,  $u_0 = \sqrt{2e^2 Z_d / a m_i}$ ,  $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS}/m_i}$  – тепловая скорость ионов солнечного ветра. Выражения (4)–(7) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Выражения (6) и (7) для токов  $I_{ph}(q_d)$  и  $I_{e,ph}(q_d)$  не содержат множителей, включающих характеристики спектров излучения. Подобное упрощение оказывается возможным в предположении стационарного распределения фотоэлектронов и электрических полей (1), когда удастся выразить указанные множители через такие параметры, как  $T_{e,ph}$ ,  $N_0$  и  $n_{e,ph}$ . Выражение (5) выведено специально для случая положительного заряда пылевых частиц и произвольных скоростей потоков ионов [10].

Система уравнений (1)–(3) решалась численно для значений  $n_{eS} = 8.7 \text{ см}^{-3}$ ,  $n_{iS} = 8.7 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{eS} = 1.4 \cdot 10^5 \text{ К}$ ,  $T_{iS} = 7 \cdot 10^4 \text{ К}$ ,  $u_i = 468 \cdot 10^5 \text{ см/с}$  и условий, соответствующих участкам лунного реголита и участкам, обогащенным водородом (характеризующиеся значениями  $N_0 \approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и  $N_0 \approx 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  соответственно). В качестве ионов солнечного ветра выбирались протоны. Результаты вычислений максимально возможных высот подъема пылевых частиц над поверхностью Луны в зависимости от угла  $\theta$  для различных размеров частиц от (100 до 600 нм) приведены на рис. 2. Сплошными линиями на рис. 2 показаны точные решения, следующие из системы уравнений (1)–(3) и полученные в предположении гладкой сферической поверхности Луны. Видно, что для каждого размера пылевых частиц существует определенное критическое значение угла  $\theta$  (для рассмотренных размеров частиц превосходящее  $74^\circ$ ), такое, что для меньших значений  $\theta$  подъем частиц при указанном предположении оказывается невозможным (см. с [9]). Причиной указанного ограничения является

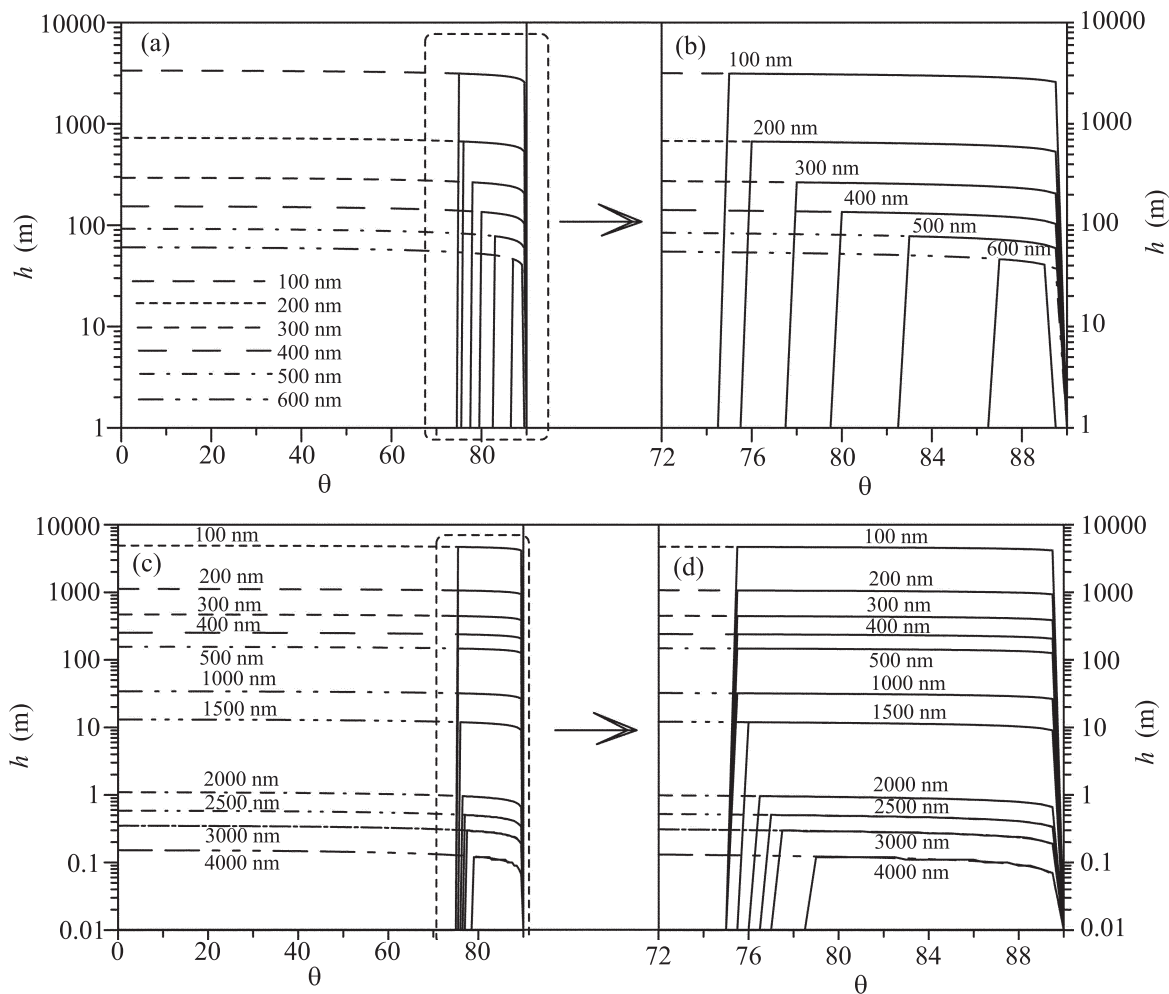


Рис. 2. Максимально возможные высоты подъема пылевых частиц над участками лунного реголита (а), (b) и над участками поверхности Луны, обогащенными водородом (с), (d), в зависимости от угла  $\theta$  для различных размеров частиц

тот факт, что на пылевую частицу действуют разнонаправленные электростатическая и гравитационная силы (см. (2)). 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 частицы  $q_d$ . На значение же  $q_d$  существенным образом влияет концентрация фотоэлектронов. При значениях  $\theta$ , меньших критического, именно фотоэлектроны, которые при попадании на пылевую частицу стремятся уменьшить ее (положительный) заряд, препятствуют доминированию электростатической силы над силой гравитационного притяжения. Однако из-за резкого падения концентрации фотоэлектронов с высотой (см. (1)) даже при углах  $\theta$ , меньших критического, в случае подъема

пылевой частицы в результате каких-либо процессов на высоту порядка 1 мм она успевает приобрести положительный заряд, достаточный для доминирования электростатической силы над гравитационной. Как следствие происходит дальнейший подъем частицы. В результате частица достигает существенно больших высот. Указанный факт отмечен на рис. 2 прерывистыми кривыми. Причинами отрыва частицы от поверхности Луны являются, в частности, нагрев пылевых частиц солнечным излучением и их охлаждение. Линейные размеры пылевых частиц в приповерхностном слое меняются, а следовательно и их давления друг на друга. В результате при определенном взаиморасположении частиц возникают силы, выталкивающие их вверх. Данный процесс зависит от коэффициента линейного расширения, теплопроводности образующей породы верхнего слоя и време-

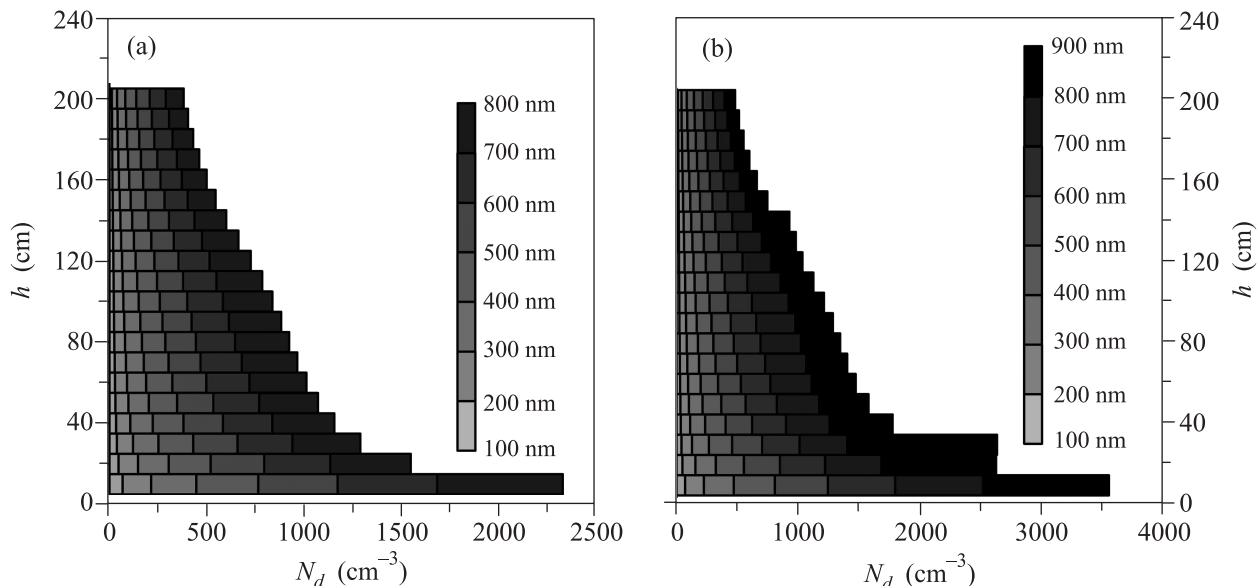


Рис. 3. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для условий, соответствующих участкам лунного реголита, для значений  $\theta = 77^\circ$  (a) и  $82^\circ$  (b)

ни теплового воздействия и может усиливаться присутствием летучей адсорбированной составляющей в поверхностном слое. Кроме того, при углах  $\theta$ , меньших критического, неоднородности поверхности Луны обеспечивают подъем частиц на высоты порядка характерного размера неоднородностей за счет электростатических эффектов. Таким образом, показана возможность подъема пылевых частиц над поверхностью Луны во всем диапазоне углов  $\theta$ . Это опровергает существование мертвой зоны [1] (в области лунных широт около  $80^\circ$ ), где частицы не поднимаются.

Расчеты в рамках системы уравнений (1)–(3) позволяют также определить распределение пылевых частиц над Луной по размерам. При этом вычисляется вероятность присутствия частицы на определенной высоте (обратно пропорциональная времени присутствия частицы на этой высоте). Указанная вероятность умножается на нормировочный множитель, который вычисляется таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание распределения (по размерам) поверхностной лунной пыли. Для определения нормировочного множителя использовались данные [11], которые позволили построить распределения пылевых частиц лунной поверхности в диапазоне размеров от 20 до 500 мкм. Оказалось, что здесь имеется хорошее согласие с распределением Колмогорова [12], характеризующим распределение частиц по размерам для случая многократного дробления. Указанный факт согласуется с выводами [11] о том, что лунная поверхность представляет собой реголит, эволю-

ционирующий из-за многократного дробления в результате ударов метеороидов. В [12] показано, что для случая многократного дробления распределение Колмогорова остается справедливым по крайней мере для размеров частиц  $\gtrsim 100$  нм. Это позволяет нам продлить полученное на основе данных [11] распределение пылевых частиц лунной поверхности вплоть до размеров 100 нм.

Полученное таким образом распределение пылевых частиц над Луной по размерам имеет вид

$$dN_d \approx \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma a^4} \exp\left\{-\frac{[\ln(a) - \text{Ln}]^2}{2\sigma^2}\right\} \times \frac{da}{\tau_{\max} \sqrt{4Z_d(h, \theta) \left(\frac{T_{\epsilon,ph}}{m_d}\right) \ln\left[1 + \sqrt{\cos\frac{\theta}{2}}\left(\frac{h}{\lambda_D}\right)\right] - 2g_M h}}, \tag{8}$$

где

$$\tau_{\max} = \int_0^{H_{\max}} \frac{dh}{\sqrt{4Z_d(h, \theta) \left(\frac{T_{\epsilon,ph}}{m_d}\right) \ln\left[1 + \sqrt{\cos\frac{\theta}{2}}\left(\frac{h}{\lambda_D}\right)\right] - 2g_M h}},$$

$H_{\max}$  – максимальная высота подъема частицы пыли с размером  $a$  ( $a$  вычисляется в микрометрах),  $A \approx 8.48 \cdot 10^{-4}$  см имеет смысл эффективной глубины слоя пыли, способной подняться над поверхностью,  $\sigma = 1.29$  – параметр распределения Колмогорова,  $\text{Ln} = \ln 61.56 \approx 4.12$  – медиана распределения Колмогорова. На основе выражения (8) построены гистограммы, характеризующие концентрации пылевых

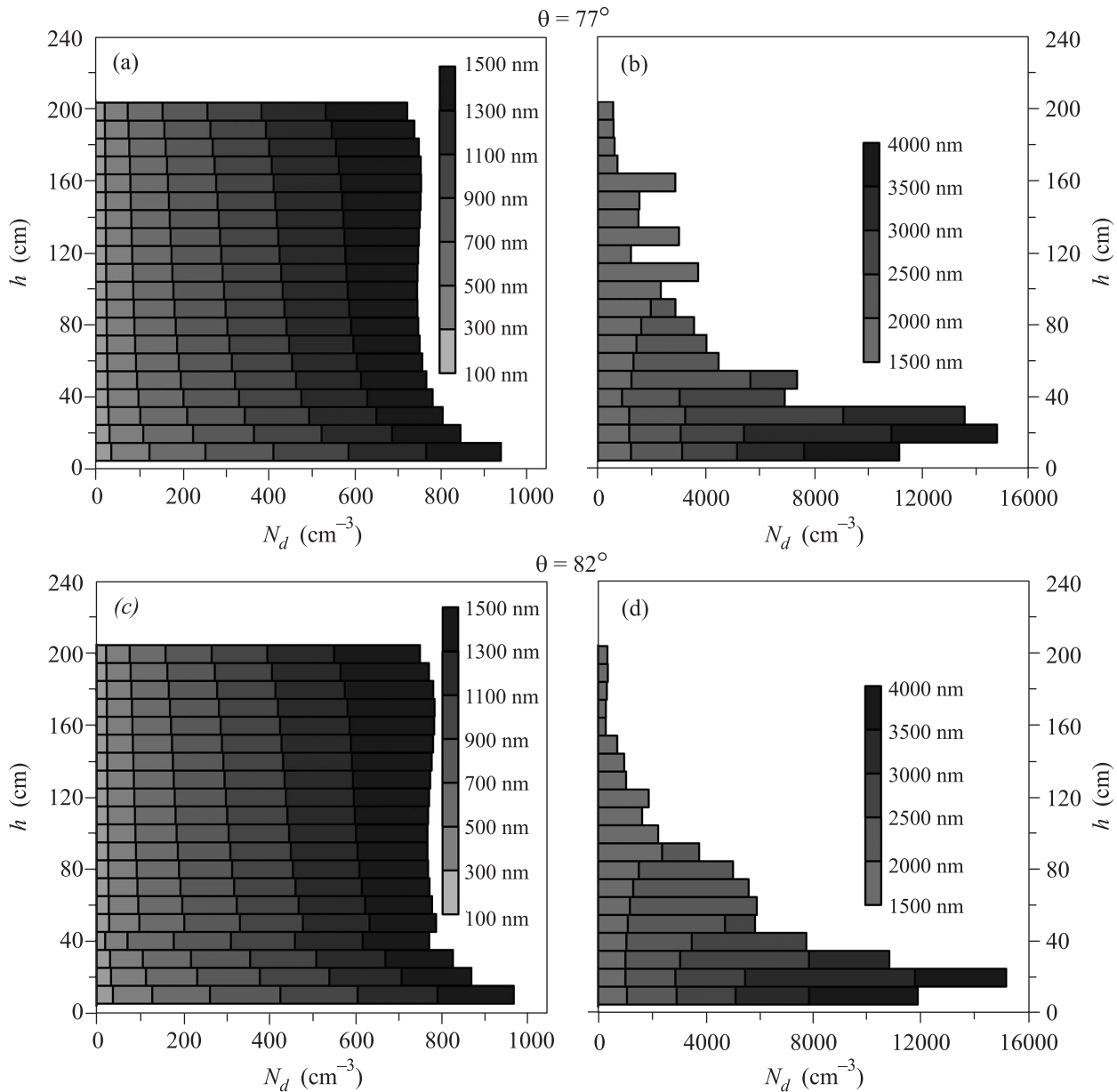


Рис. 4. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для условий, соответствующих участкам, обогащенным водородом, для значений  $\theta = 77^\circ$  (а), (б) и  $82^\circ$  (с), (д)

частиц над поверхностью Луны для условий, соответствующих участкам лунного реголита (рис. 3) и участкам, обогащенным водородом (рис. 4). Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из графиков, представленных на рис. 3 и 4, характеризует концентрацию частиц (в  $\text{см}^{-3}$ ) на соответствующих высотах с размерами в соответствующем интервале (указанном на шкале в правой части графика). Общая длина горизонтального участка на графике соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом графике.

Таким образом, плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны включает в себя положительно заряженную пыль, фотоэлектроны, электроны и ионы солнечного ветра. Характеристики пыли, поднимающейся над участками лунного реголита и над участками лунной поверхности, обогащенными водородом, различны. На это указывают, например, распределения пыли по размерам и высотам. В связи с отсутствием мертвой зоны в области лунных широт около  $80^\circ$ , в которой, как предполагалось в [1], частицы пыли не могут

подниматься над поверхностью Луны, не имеется существенных ограничений на место посадки аппаратов будущих лунных миссий, которые должны изучать пыль в приповерхностном слое Луны.

Работа выполнена по Программе # 22 фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект # 12-02-00270-а) и Фонда “Династия”.

1. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, *Adv. Space Res.* **37**, 59 (2006).
2. I. G. Mitrofanov, A. B. Sanin, W. V. Boynton et al., *Science*. **330**, 483 (2010).
3. Е. К. Колесников, А. С. Мануйлов, *Астрономический журнал* **59**, 996 (1982).
4. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, W. M. Farrell, and M. R. Collier, *J. Astronautics* **28**, 166 (2007).
5. D. A. Glenar, T. J. Stubbs, J. E. McCoy, and R. R. Vondrak, *Planet. Space Sci.* **59**, 1695 (2011).
6. E. Walbridge, *J. Geophys. Res.* **78**, 3668 (1973).
7. Г. С. Иванов-Холодный, В. В. Фирсов, *Геомагн. и астрономия* **14**, 392 (1974).
8. H. E. Hinteregger, *Space Sci. Rev.* **4**, 461 (1965).
9. Е. К. Колесников, А. Б. Яковлев, *Астрономический вестник* **31**, 70 (1997).
10. T. V. Losseva, S. I. Popel, A. P. Golub' et al., *Phys. Plasmas*. **19**, 013703 (2012).
11. J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horanyi et al., *Rev. Geophys.* **45**, RG2006 (2007).
12. В. В. Адушкин, Л. М. Перник, С. И. Попель, *ДАН* **415**, 247 (2007).