Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 8, с. 469 – 475

Пылевая плазма у поверхности Фобоса

С. И. Попель[+*×1)], *А. П. Голубь*[+], *А. В. Захаров*[+], *Л. М. Зеленый*[+*×]

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

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

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

Поступила в редакцию 15 сентября 2017 г.

Показано, что в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Фобоса определены функции распределения фотоэлектронов у его поверхности, найдены высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Отмечается, что из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются более крупные пылевые частицы, чем над поверхностью Луны. При этом роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности, на Фобосе значительно уменьшается.

DOI: 10.7868/S0370274X17200012

В настоящее время существенное влияние уделяется исследованию системы Марса космическими аппаратами. Успешно функционируют аппараты Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter и др. Поверхность Марса исследуют марсоходы Mars Exploration Rover Opportunity и Mars Science Laboratory Curiosity. Готовится миссия Phobos-Grunt 2 на спутник Марса Фобос. Интерес к исследованию Фобоса обусловлен, в частности, тем, что из-за слабого гравитационного поля Фобос оказывается более доступным для пилотируемых полетов, чем Марс. Ускорение свободного падения на Фобосе составляет приблизительно $0.0057\,\text{м/с}^2$, и посадка на него космического аппарата скорее напоминает стыковку с другим аппаратом, чем приземление на планету. Согласно наблюдениям космического аппарата Викинг [1, 2], а затем космических аппаратов Фобос-2 и Марс-Экспресс [3], поверхность Фобоса покрыта пылью, которая состоит из несвязанных друг с другом небольших крупинок реголита, образовавшегося в результате микрометеороидной бомбардировки.

Слабая гравитация усиливает роль пыли на Фобосе, поскольку даже слабое возмущение может привести к формированию массивного пылевого облака над поверхностью этого спутника Марса. В рамках миссии Phobos-Grunt 2 предполагается обнаружение пылевых частиц на орбите вокруг Марса и у поверхности Фобоса, а также определение основных параметров пылевых частиц (импульса, массы, скорости, заряда). Кроме того, ожидается измерение параметров плазмы и определение локального электрического поля у поверхности Фобоса. Для этих целей будут использованы пьезоэлектрические ударные сенсоры (см. рис. 1), работа которых основана на ударном воздействии пылевой частицы, а также зонды для измерений параметров плазмы и локального электрического поля у поверхности Фобоса.

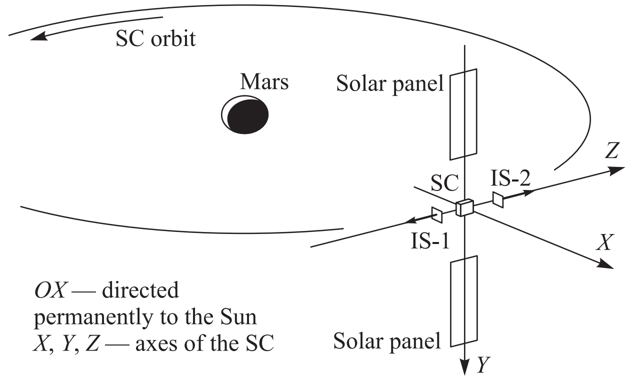

Рис. 1. Схема орбитального движения космического аппарата (SC) Phobos-Grunt 2. Отмечены пьезоэлектрические ударные сенсоры IS-1 и IS-2, которые, как предполагается, будут иметь возможность определять основные параметры пылевых частиц (импульс, массу, скорость, заряд). Рассматривается возможность установки ударных сенсоров на панелях солнечных батарей (Solar panel)

1)e-mail: popel@iki.rssi.ru

Фобос, подобно Луне, является безатмосферным космическим телом. Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы [4–13]. Ожидается, что аналогичная ситуация складывается и над поверхностью Фобоса. Поверхность Фобоса заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца и плазмы солнечного ветра. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Фобоса испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, присутствующими над поверхностью Фобоса, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Фобоса или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Фобоса, подъему и движению пыли.

Следует отметить важную роль в формировании плазменно-пылевой системы в окрестности Фобоса ударов метеороидов о его поверхность. Образовавшиеся в результате бомбардировки метеороидами вторичные частицы, выбитые с поверхности Фобоса, приобретают скорость, превышающую скорость убегания (для Фобоса, приблизительно равную 10 м/с) и покидают его. При этом, если скорость вторичных частиц оказывается меньше орбитальной скорости Фобоса (2.1 км/с), частицы могут оказаться на орбитах вокруг Марса. С учетом аналогичных процессов у другого спутника Марса – Деймоса возможным оказывается формирование пылевого гало вблизи орбит Фобоса и Деймоса [3, 14].

Работы [3, 14] посвящены, в основном, рассмотрению пыли над Фобосом на значительных высотах h, бóльших характерного линейного размера Фобоса ($\approx$ 20 км). Практически нет данных о параметрах пыли в приповерхностном слое ($h \ll 20$ км). По аналогии с ситуацией у Луны можно ожидать, что основная часть пылевых частиц содержится именно в приповерхностном слое над Фобосом, где образование пылевой плазмы связано с процессами зарядки пылевых частиц, их взаимодействием с заряженной поверхностью Фобоса, подъемом и движением заряженной пыли в электрическом и гравитационном полях, а скорости пылевых частиц в этом слое существенно меньше 10 м/с. Свойства пылевой плазмы у поверхности Фобоса и будут, в частности, изучаться в рамках будущей миссии Phobos-Grunt 2. В настоящей работе приводится описание свойств пылевой плазмы в приповерхностном слое над освещенной частью Фобоса. Вычисляются электрические поля, а также параметры фотоэлектронов и пыли над поверхностью Фобоса.

Для описания плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Фобоса используется модель [8], в которой зарядка пылевых частиц над поверхностью Фобоса вычисляется с учетом влияния фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также солнечного излучения. Не учитывается воздействие светового давления на динамику пылевых частиц, поскольку, как показывают оценки, указанное воздействие сказывается лишь для частиц с размерами, заведомо не превышающими 1 нм. Производится учет фотоэлектронов как от поверхности Фобоса, так и от поверхностей парящих над ней пылевых частиц. Рассмотрение фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц требует самосогласованного описания, поскольку фотоэлектроны влияют на распределения пылевых частиц, в то время как распределения пылевых частиц определяют количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить ее удается только численными методами.

Для нахождения концентраций фотоэлектронов над поверхностью Фобоса решают систему уравнений, состоящую из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение потенциала у поверхности Фобоса и на бесконечном удалении от нее. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям у поверхности Фобоса $\Phi_{\rm e}$ определяется стандартным образом [15] на основе расчета плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твердым телом под действием излучения:

$$\Phi_{\rm e}(E_{\rm e})dE_{\rm e} = 2\cos\theta\sqrt{\frac{2m_{\rm e}}{E_{\rm e}}}\int_{E_{\rm e}+W}^{\infty} Y(E_{\rm ph})F_{\rm ph}d\rho dE_{\rm ph}, \tag{1}$$

где $E_{\rm e}$ – энергия фотоэлектрона, θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце, $m_{\rm e}$ – масса электрона, W – работа выхода фотоэмиссии, $E_{\rm ph}$ – энергия фотона, $Y(E_{\rm ph})$ – квантовый выход, зависящий от энергии фотонов, $F_{\rm ph}dE_{\rm ph}$ – число фотонов солнечного излучения с энергией $E_{\rm ph}$ в интервале $dE_{\rm ph}$, пересекающих в единицу времени единичную площадку, перпендикулярную к направлению движения фотонов,

$$d\rho = \frac{6(E_m - E_e)}{E_m^3} E_e dE_e, \quad 0 \le E_e \le E_m = E_{ph} - W$$

– вероятность [15] того, что в результате поглощения фотона энергии E_{ph} испускается электрон с энергией E_e в интервале энергий dE_e. Коэффициент "2" в правой части (1) обусловлен тем, что в стационарном состоянии количества электронов, покидающих и поглощаемых поверхностью твердого тела, равны друг другу. При выводе формулы (1) пренебрегалось возможной анизотропией функции распределения фотоэлектронов в пространстве скоростей, обусловленной неровностью поверхности Фобоса.

Функция распределения (1) может быть использована для нахождения концентрации N_0 и температуры T_e фотоэлектронов у поверхности Фобоса:

$$N_0 = \int_0^\infty \Phi_e(E_e) dE_e, \tag{2}$$

$$T_e = \frac{2}{3}\langle E_e \rangle \equiv \frac{2}{3N_0}\int_0^\infty E_e \Phi_e(E_e) dE_e. \tag{3}$$

При вычислении функции распределения фотоэлектронов, их концентрации и температуры важными параметрами являются спектр солнечного излучения, квантовый выход и работа выхода реголита. Типичные значения работы выхода и квантового выхода для реголита на Фобосе неизвестны. Полагаем, что они близки к аналогичным значениям на Луне [10]. Так, в качестве значений работы выхода используем значения в пределах 5–6 эВ, а для квантового выхода в расчетах используем его зависимость, приведенную в работе [16]. При этом максимальное значение квантового выхода [16], приблизительно равное 0.09 ± 0.003, достигается при длине электромагнитной волны, приблизительно равной 900 Å, что, в свою очередь, соответствует $E_{ph} \approx 13.7$ эВ. При значениях E_{ph} бóльших и меньших 13.7 эВ, квантовый выход существенным образом уменьшается (на несколько порядков величины). Так при $E_{ph} \approx 7$ эВ значение $Y(E_{ph})$ уменьшается до $\sim 10^{-6}$, при приближении E_{ph} к работе выхода квантовый выход уменьшается еще на 1–2 порядка величины.

Что касается спектров солнечного излучения, их форма соответствует форме спектров у Луны [10], однако интенсивность оказывается меньшей, что обусловлено значением Солнечной постоянной, которое на орбите Марса составляет 592 Вт/м^2, т.е. 43 % от значения Солнечной постоянной на орбите Земли. Соответственно спектры солнечного излучения и на орбите Марса существенно варьируются в течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности – см. рис. 2, на котором приводятся спектры, характеризующие различную солнечную активность. Однако, несмотря на вариации количества энергии, излучаемой Солнцем в ультрафиолетовом диапазоне (основном с точки зрения испускания фотоэлектронов) в указанном цикле не происходит существенных (на порядки величины) изменений значений N_0 и T_e.

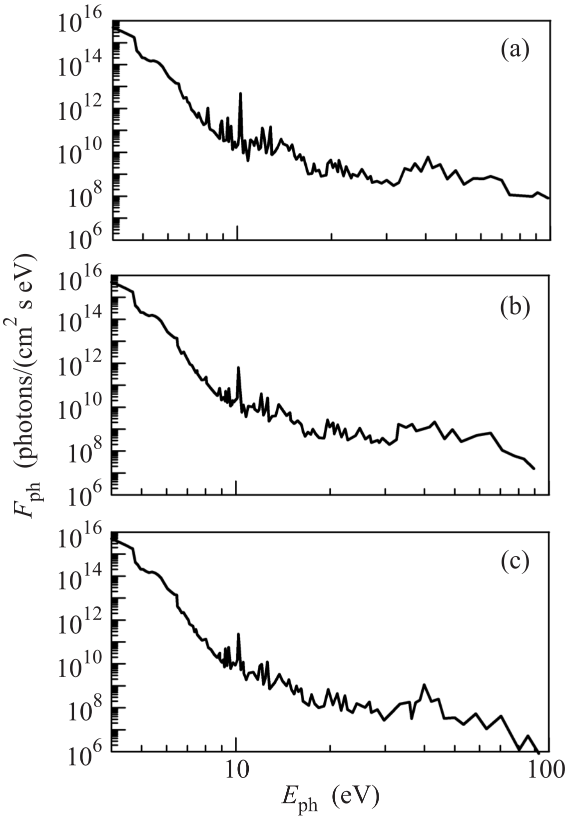

Рис. 2. Потоки солнечного излучения на орбите Марса в зависимости от энергии фотонов (в логарифмическом масштабе), соответствующие солнечной вспышке класса X28 (a), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c)

В табл. 1 приведены параметры фотоэлектронов (N_0, T_e), рассчитанные по формулам (1)–(3) при $\cos\theta = 1$, в приповерхностном слое освещенной части Фобоса для различной солнечной активности, соответствующей солнечной вспышке класса X28 (столбец I), солнечному максимуму (столбец II) и солнечному минимуму (столбец III), и различных значений работы выхода W (строки, характеризуемые индексом "1" в N_0 и T_e соответствуют $W = 6$ эВ, а индексом "2" – $W = 5.5$ эВ). Из табл. 1 следует, что изменение значения W практически не сказывается на значениях N_0 и T_e из-за близких к нулю значений квантового выхода [16] при приближении E_{ph} к работе выхода. Зависимость параметров N_0 и T_e от солнечной активности также не очень существенная. Значения

N_0 при $\cos\theta \neq 1$ получаются умножением данных табл. 1 на значение $\cos\theta$. Электронная температура T_e не зависит от $\cos\theta$.

Таблица 1. Параметры фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Фобоса для различной солнечной активности (I, II, III) и различных значений работы выхода (см. текст)

Параметр	I	II	III
N_{01} (см$^{-3}$)	$3.7\cdot10^1$	$1.3\cdot10^1$	$0.57\cdot10^1$
T_{e1} (эВ)	2.1	1.9	1.2
N_{02} (см$^{-3}$)	$3.7\cdot10^1$	$1.3\cdot10^1$	$0.65\cdot10^1$
T_{e2} (эВ)	2.1	1.9	1.2

На рис. 3 изображены функции распределения $f_e(E_e) \equiv \Phi_e(E_e)/N_0$, нормированные на единицу ($\int_0^\infty f_e(E_e)dE_e = 1$), вычисленные для данных, соответствующих $W = 6$ эВ и $W = 5.5$ эВ, а также различным уровням солнечной активности. Имеется сильное отличие указанных функций распределения от максвелловских.

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

$$m_d \frac{d^2h}{dt^2} = q_d E(h,\theta) - m_d g_0, \tag{4}$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \tag{5}$$

где m_d – масса пылевой частицы; h – высота над поверхностью Фобоса; q_d – заряд пылевой частицы; g_0 – ускорение свободного падения у поверхности Фобоса; $I_e(q_d)$ 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:

$$I_e \approx -\pi a^2 e n_{eS}\sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}}\left(1+\frac{Z_d e^2}{aT_{eS}}\right), \tag{6}$$

$$\begin{aligned} I_i \approx{}& \pi a^2 e n_{iS}\sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}}\frac{u_{Ti}}{u_i}\times \\ &\times\left\{\frac{u_i+u_0}{u_{Ti}}\exp\left(-\frac{(u_i-u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right)+\right. \\ &\left.+\frac{u_i-u_0}{u_{Ti}}\exp\left(-\frac{(u_i+u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right)\right\}+ \\ &+\pi a^2 e n_{iS}\sqrt{\frac{T_{iS}}{4m_i}}\frac{u_{Ti}}{u_i}\left\{\mathrm{erf}\left(\frac{u_i+u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right)+\right. \\ &\left.+\mathrm{erf}\left(\frac{u_i-u_0}{\sqrt{2}u_{Ti}}\right)\right\}\left(1+\frac{2Z_d e^2}{aT_{iS}}+\frac{u_i^2}{u_{Ti}^2}\right), \end{aligned} \tag{7}$$

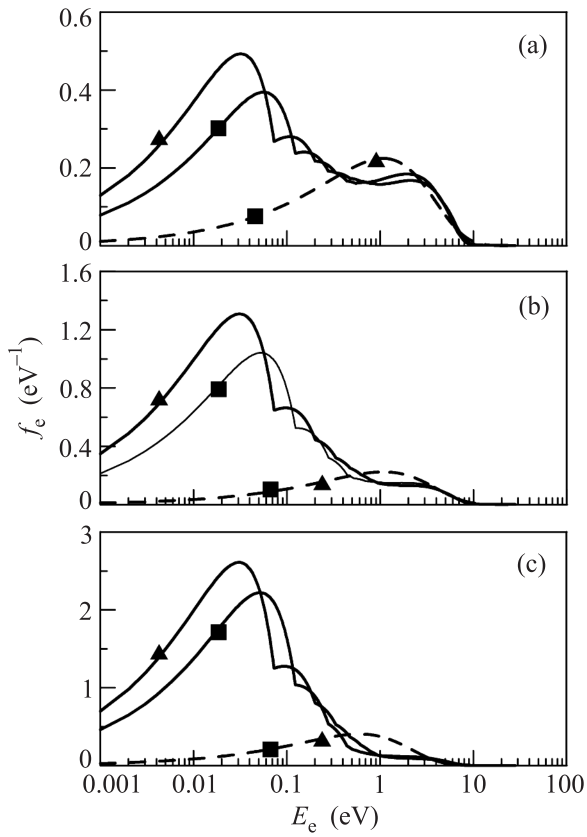

Рис. 3. Функции распределения фотоэлектронов f_e по энергиям (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Фобоса, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (a), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ (■) и $W = 5.5$ эВ (▲), квантовый выход определяется зависимостью [16]. Пунктиром показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми, и практически совпадающие при $W = 6$ эВ и $W = 5.5$ эВ

$$\begin{aligned} I_{ph} \approx{}& -\pi a^2 e N_0\sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}}\times \\ &\times\left(1+\frac{Z_d e^2}{aT_{e,ph}}\right)\exp\left(-\frac{Z_d e^2}{aT_{e,ph}}\right), \end{aligned} \tag{8}$$

$$I_{e,ph} \approx -\pi a^2 e n_{e,ph}\sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}}\left(1+\frac{Z_d e^2}{aT_{e,ph}}\right). \tag{9}$$

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_i – масса иона, $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2/am_i}$, $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS}/m_i}$ – тепловая скорость ионов солнечного ветра, u_i – скорость солнечного ветра, $T_{e,ph}$ –

температура фотоэлектронов, а $n_{\mathrm{e,ph}}$ – концентрация фотоэлектронов, учитывающие фотоэлектроны как с поверхности Фобоса, так и с поверхностей пылевых частиц.

Выражения (6)–(9) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Выражение (8) для тока I_{ph} не имеет множителя, содержащего характеристики спектров излучения, что оказывается возможным в ситуации, когда у поверхностей пылевых частиц и Фобоса одинаковая работа выхода. В этой ситуации указанный множитель удается выразить через значение N_0. Выражение (7) выведено специально для случая положительного заряда пылевых частиц и произвольных скоростей потоков ионов [17].

Расчеты в рамках системы уравнений (4)–(5) позволяют, в частности, определить заряды пылевых частиц, а также электрическое поле над поверхностью Фобоса. При этом необходимо учитывать следующее выражение для электрического поля E, формируемого заряженной поверхностью Фобоса, в зависимости от высоты h над его поверхностью:

$$E(h,\theta) = \frac{2T_{\mathrm{e,ph}}}{e}\frac{\sqrt{\cos\theta/2}}{\lambda_{\mathrm{D}} + h\sqrt{\cos\theta/2}}, \qquad (10)$$

где λ_{D} – дебаевский радиус фотоэлектронов у поверхности Фобоса.

Выражение (10) получено в результате совместного решения кинетического уравнения для фотоэлектронов и уравнения Пуассона. Зависимость электрического поля от угла θ в (10) обусловлена изменением числа фотонов, которые поглощаются единицей поверхности Фобоса, в зависимости от угла θ. Распределение электрического поля, аналогичное (10), получено в работах [18–20].

Для каждого размера пылевых частиц существует определенное критическое значение угла $\theta \approx \arccos\left[(1/4)\left(1 - \sqrt{2}m_{\mathrm{d}}g_0\lambda_{\mathrm{D}}e^2/aT_{\mathrm{e}}^2\right)\right]$ (превосходящее 75.52°), такое что для меньших значений θ подъем частиц над поверхностью Фобоса оказывается невозможным. Для частиц с размерами, не превосходящими 10 мкм в условиях пылевой плазмы над Фобосом, критическое значение угла θ не превосходит 76.2°. Причиной указанного ограничения является тот факт, что на пылевую частицу действуют разнонаправленные электростатическая и гравитационная силы (см. (4)). Условием отрыва положительно заряженной пылевой частицы от положительно заряженной поверхности Фобоса является доминирование электростатической силы над силой гравитационного притяжения. Величина электростатической силы зависит от заряда 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. Отметим однако, что при углах θ, меньших критического, неоднородности профиля поверхности Фобоса могут обеспечить подъем частиц на высоты порядка характерного размера неоднородностей за счет электростатических эффектов, в результате чего частица может успеть приобрести положительный заряд, достаточный для доминирования электростатической силы над гравитационной и, как следствие, происходит дальнейший подъем частицы.

При рассмотрении плазменно-пылевой системы у Луны [7, 8] использовались данные исследования лунного реголита [21], которые позволили построить распределения пылевых частиц лунной поверхности в диапазоне размеров от 20 до 500 мкм. В ситуации с Фобосом такого рода экспериментальных данных нет. Поэтому для определения концентрации N_{d} пылевых частиц используем условие, выражающее тот факт, что в рассматриваемой ситуации пылевые частицы приобретают заряды, в основном, за счет испускания фотоэлектронов, т.е.

$$N_{\mathrm{d}} \approx (n_{\mathrm{e,ph}} - n_{\mathrm{e,ph0}})/Z_{\mathrm{d}}. \qquad (11)$$

В (11) учтено, что фотоэлектроны испускаются не только с поверхностей пылевых частиц, но также и с поверхности Фобоса. Высотная зависимость концентрации $n_{\mathrm{e,ph0}} = N_0\cos\theta/[1+\sqrt{\cos\theta/2}(h/\lambda_{\mathrm{D}})]^2$ характеризует фотоэлектроны, выбитые электромагнитными квантами с поверхности Фобоса (ср. [18–20]).

На основе представленной физико-математической модели удается численными методами получить величины, характеризующие высотные распределения пылевых частиц над поверхностью Фобоса с учетом, в том числе, процесса испускания фотоэлектронов пылевыми частицами, присутствующими над ней. При расчетах использовались следующие параметры солнечного ветра: $n_{\mathrm{eS}} = n_{\mathrm{iS}} = 3.7\,\text{см}^{-3}$, $T_{\mathrm{eS}} = 1.4\cdot10^5$ К, $T_{\mathrm{iS}} = 7\cdot10^4$ К, $u_{\mathrm{i}} = 468\cdot10^5$ см/с. В качестве ионов солнечного ветра выбирались протоны. Данные, характеризующие пылевые частицы и электрические поля над поверхностью Фобоса для условий, соответствующих солнечному максимуму (см. рис. 2b), работе выхода реголита $W = 5.5$ эВ и углам $\theta = 77^\circ$, 82° и 87°, приведены на рис. 4, где a представляет собой максимальный размер частиц на соответствующей высоте h. Значения зарядового числа

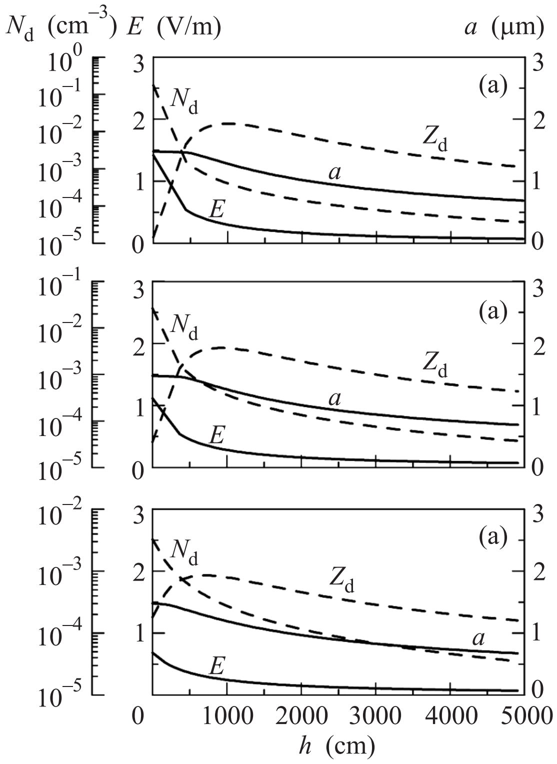

Рис. 4. Максимальные размеры a, зарядовые числа Z_d, концентрации N_d пылевых частиц, а также электрические поля E в зависимости от высоты h над поверхностью Фобоса для углов $\theta = 77^\circ$ (a), 82° (b) и 87° (c)

Z_d вычислялись для приведенных на рис. 4 значений a. Характерные скорости пылевых частиц на высотах $h \sim 1$ м составляют порядка 10 см/с. Вычисления для работы выхода $W = 6$ эВ дают сходные результаты, что обусловлено близостью к нулю значений квантового выхода [16] при приближении E_{ph} к работе выхода.

Таким образом, из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются существенно более крупные пылевые частицы ($a \sim 1$ мкм), чем над поверхностью Луны ($a \sim 0.1$ мкм [8]). В этом случае роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности [12, 22], на Фобосе значительно уменьшается. Фактически можно считать формирование пылевой плазмы над поверхностью Фобоса, связанным с фотоэлектрическими и электростатическими процессами, описанными в настоящей работе. Роль метеороидов при формировании пылевой плазмы в приповерхностном слое над Фобосом также оказывается существенно меньшей, чем в ситуации с Луной [12]. Вместе с тем, на больших расстояниях от Фобоса (существенно превосходящих его линейные размеры ~ 20 км) именно эффекты метеороидов приводят к формированию пылевого гало, состоящего из частиц с размерами порядка 10 мкм и концентрацией $N_d \sim 10^3$ км$^{-3}$ [23] (которая оказывается значительно меньшей концентрации пылевых частиц $N_d \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ см$^{-3}$ у поверхности Фобоса, связанной с фотоэлектрическими и электростатическими процессами).

Итак, за счет фотоэлектрических и электростатических процессов в приповерхностном слое над освещенной частью Фобоса происходит формирование пылевой плазмы для значений угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, превосходящих примерно 76°. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Фобоса получены функции распределения фотоэлектронов у поверхности Фобоса, а также высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Показано, что над поверхностью Фобоса поднимаются пылевые частицы с характерными размерами порядка 1 мкм, у его поверхности присутствуют электрические поля с напряженностью порядка 1 В/м. Типичные концентрации пылевых частиц составляют $\sim 10^{-2}$–10^{-1} см$^{-3}$, а фотоэлектронов – порядка 10 см$^{-3}$.

Таким образом, представлено описание плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над Фобосом на основе самосогласованной модели. Данная модель не может использоваться для описания нестационарных процессов, возникающих, например, в области терминатора на Фобосе. Это подразумевает необходимость дальнейшего развития модели, что предполагается осуществить в будущем. Необходимо также иметь более определенные данные о параметрах плазменно-пылевой системы в окрестности Фобоса, которые как надеются авторы, будут получены в будущих космических миссиях.

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

1. P. Thomas, Icarus **40**, 223 (1979).
2. P. Thomas and J. Veverka, Icarus **42**, 234 (1980).
3. A. Zakharov, M. Horányi, P. Lee, O. Witasse, and F. Cipriani, Planet. Space Sci. **102**, 171 (2014).
4. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, Adv. Space Res. **37**, 59 (2006).

5. Z. Sternovsky, P. Chamberlin, M. Horányi, S. Robertson, and X. Wang, J. Geophys. Res. **113**, A10104 (2008).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
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. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and B. Atamaniuk, Phys. Plasmas **22**, 123701 (2015).
12. 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).
13. С. И. Попель, А. П. Голубь, Л. М. Зеленый, М. Хораньи, Письма в ЖЭТФ **105**, 594 (2017).
14. S. Soter, *The dust belts of Mars. Rep. 462*, Cornell Center for Radiophysics and Space Research Physics, Ithaca, N.Y. (1971).
15. E. Walbridge, J. Geophys. Res. **78**, 3668 (1973).
16. 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 and D. Reidel, Dordrecht (1973), p. 389.
17. T. V. Losseva, S. I. Popel, A. P. Golub', Yu. N. Izvekova, and P. K. Shukla, Phys. Plasmas **19**, 013703 (2012).
18. Е. К. ,Колесников, А. С. Мануйлов, Астрономический журнал **59**, 996 (1982).
19. R. J. L. Grard and J. K. E. Tunaley, J. Geophys. Res. **76**, 2498 (1971).
20. Е. К. Колесников, А. Б. Яковлев, Астрономический вестник **31**, 70 (1997).
21. J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, and S. Sture, Rev. Geophys. **45**, RG2006 (2007).
22. C. M. Hartzell and D. J. Scheeres, Planet. Space Sci. **59**, 1758 (2011).
23. A. V. Krivov and D. P. Hamilton, Icarus **128**, 335 (1997).