Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 7, с. 440 – 445 © 2021 г. 10 апреля

Нестационарные процессы при формировании пылевой плазмы у поверхности Фобоса

А. П. Голубь[+], *С. И. Попель*[+*1)]

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

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

Поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.
После переработки 24 февраля 2021 г.
Принята к публикации 4 марта 2021 г.

Обсуждается формирование пылевой плазмы за счет фотоэлектрических и электростатических процессов в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Фобоса определены параметры, характеризующие траектории движения пылевых частиц. Показано, что затухание колебаний пылевой частицы над поверхностью спутника Марса связано с вариациями ее заряда, что согласуется с представлениями об аномальной диссипации, природа которой вытекает из процессов, связанных с вариацией зарядов пылевых частиц. Продемонстрировано, что для большинства пылевых частиц, поднимающихся над поверхностью Фобоса из-за фотоэлектрических и электростатических процессов, время затухания их колебаний оказывается большим продолжительности светлого времени суток, т.е. нестационарность плазменно-пылевой системы над освещенной частью поверхности Фобоса проявляется практически в течение всей продолжительности дня на нем. Определены максимальные значения высоты подьема пылевых частиц и зарядового числа, которые могут быть достигнуты пылевыми частицами разных размеров, а также приведена оценка типичных концентраций пылевых частиц и фотоэлектронов над Фобосом. Для получения более определенных данных о параметрах плазменно-пылевой системы в окрестности Фобоса необходима более детальная информация о свойствах его грунта, которая, как ожидается, будет получена в будущих космических миссиях.

DOI: 10.31857/S1234567821070028

В настоящее время существенное влияние уделяется исследованию системы Марса космическими аппаратами (см., например, [1–7]). Успешно функционируют аппараты Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter и др. Поверхность Марса исследуют марсоходы Mars Exploration Rover Opportunity, Mars Science Laboratory Curiosity и Perseverance. Готовится миссия "Бумеранг" (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 [8, 9], а затем космических аппаратов Фобос-2 и Марс-Экспресс [10], 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 "Бумеранг" предполагается обнаружение и определение основных параметров (импульса, массы, скорости, заряда) пылевых частиц у поверхности Фобоса. Кроме того, ожидается измерение параметров плазмы и определение локального электрического поля у поверхности спутника Марса. Для этих целей будут использованы пьезоэлектрические ударные сенсоры и зарядочувствительные сетки (см. рис. 1).

В этой связи важное значение приобретает исследование пылевой плазмы у поверхности Фобоса. В работе [11] представлено описание плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над освещенной частью Фобоса на основе самосогласован-

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

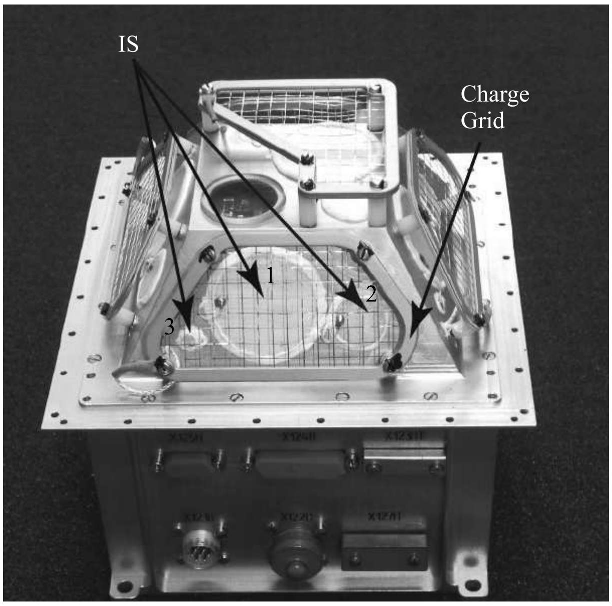

Рис. 1. Фотография прибора для исследования пыли в системе Марса. Отмечены пьезоэлектрические ударные сенсоры (IS) и зарядочувствительная сетка (Charge Grid)

ной модели. Роль метеороидов при формировании плазменно-пылевой системы у Фобоса изучалась в [10, 12, 13]. Модель [11] не использовалась для описания нестационарных процессов, возникающих, например, из-за конечности (по времени) светлого времени суток на Фобосе. В настоящей работе предпринимается попытка определить, к каким следствиям при описании пылевой плазмы у поверхности Фобоса может привести учет конечности (по времени) светлого времени суток, длительность которого на Фобосе оценивается как половина периода его вращения вокруг своей оси, т.е. около 14000 с. Кроме того, хорошо известно [14–17], что в пылевой плазме процессы, связанные с вариацией зарядов пылевых частиц, часто оказываются существенно неравновесными, и роль аномальной диссипации, природа которой вытекает из процессов, связанных с вариацией зарядов пылевых частиц, часто оказывается решающей. Одной из целей настоящей работы является обсуждение роли вариации зарядов пылевых частиц в процессах формирования пылевой плазмы у поверхности Фобоса.

Фобос является безатмосферным космическим телом. Его поверхность заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца и плазмы солнечного ветра [11]. 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.

Для описания плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Фобоса используется модель [11] с той лишь разницей, что при движении пылевых частиц вдоль их траекторий учитываются вариации заряда пылевых частиц, обусловленные влиянием фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также солнечного излучения на пылевые частицы. 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.

Для нахождения концентраций фотоэлектронов над поверхностью Фобоса производится решение 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 поверхности Фобоса и на бесконечном удалении от нее. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям у поверхности Фобоса Φ_e определяется стандартным образом [18] на основе расчета плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твердым телом под действием излучения:

$$\Phi_e(E_e)dE_e = 2\cos\theta\sqrt{\frac{2m_e}{E_e}}\int_{E_e+W}^{\infty} Y(E_{ph})F_{ph}d\rho dE_{ph}, \tag{1}$$

где E_e – энергия фотоэлектрона, E_{ph} – энергия фотона, W – работа выхода фотоэмиссии, θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце, m_e – масса электрона, $Y(E_{ph})$ – квантовый выход, зависящий от энергии фотонов, $F_{ph}dE_{ph}$ – число фотонов солнечного излучения с энергией E_{ph} в интервале dE_{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 [18] того, что в результате поглощения фотона энергии E_{ph} испускается электрон с энергией E_e в интервале энергий dE_e. При выводе (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 вещества грунта Фобоса. Типичные значения работы выхода и квантового выхода вещества грунта Фобоса неизвестны. Полагаем, что они близки к аналогичным значениям на Луне [11, 19]. Так, в качестве значений работы выхода используем значение 6 эВ, а для квантового выхода в расчетах используем его зависимость, приведенную в работе [20]. При этом максимальное значение квантового выхода [20], 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}, больших и меньших 13.7 эВ, величина квантового выхода существенным образом уменьшается (на несколько порядков величины). Так при $E_{ph} \approx 7$ эВ $Y(E_{ph})$ падает до значения $\sim 10^{-6}$, 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 [19], 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. 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. В проводимых ниже вычислениях используются значения N_0 и T_e, рассчитанные [11] для условий приповерхностного слоя освещенной части Фобоса при солнечной активности, соответствующей солнечному максимуму: $N_0 \approx 130 \cos\theta$ см$^{-3}$, $T_e = 1.9$ эВ.

Поведение пылевых частиц в приповерхностном слое описывается уравнениями, описывающими 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 h – высота над поверхностью Фобоса; m_d – масса пылевой частицы; q_d – ее заряд; 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:

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

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

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

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

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 $n_{e,ph}$ – концентрация фотоэлектронов. Выражения (6)–(9) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Выражение (8) для тока I_{ph} не содержит множителя, содержащего характеристики спектров излучения, что оказывается возможным в ситуации, когда поверхности пылевых частиц и поверхность Фобоса имеют одинаковую работу 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 [21].

Расчеты в рамках системы уравнений (4)–(5) позволяют, в частности, определить траектории и параметры движения пылевых частиц. На рисунке 2 приведены параметры, характеризующие движение пылевой частицы радиуса $a = 1.445$ мкм с изменяющимся, согласно уравнению (5), зарядом $q_d = Z_d e$ для значения угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равного 87°. Видно существенное затухание колебаний вокруг устойчивого положения $h_{d0} = 236$ см, $u_{d0} = 0$, $Z_{d0} = 2864$. Здесь h_d – высота подъема пылевой частицы, u_d – ее скорость. Период колебаний – 530 с.

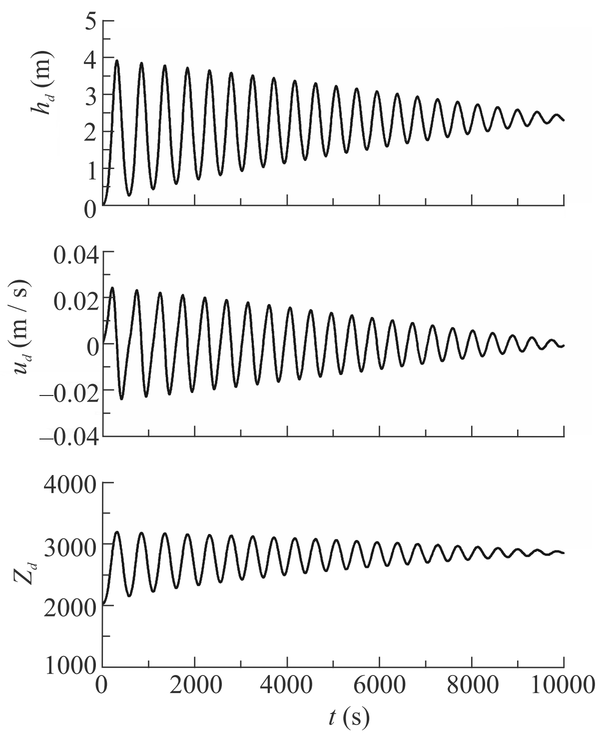

Рис. 2. Параметры, характеризующие траекторию движения пылевой частицы радиуса $a = 1.445$ мкм с изменяющимся зарядом над поверхностью Фобоса при $\theta = 87°$: высота подъема h_d, скорость u_d, зарядовое число Z_d

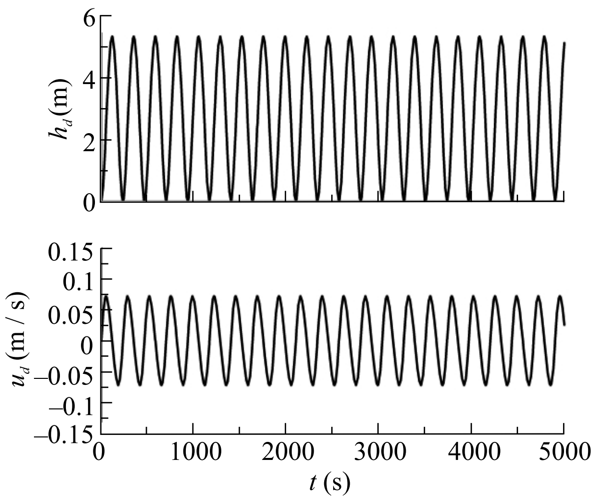

Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для пылевой частицы радиуса $a = 1.445$ мкм с постоянным зарядом

На рисунке 3 приведены те же, что и на рис. 2, параметры, но полученные в предположении постоянного значения зарядового числа $Z_d = Z_{d0} = 2864$. Виден незатухающий характер колебаний вокруг устойчивого положения. Таким образом, имеется связь между затуханием колебаний пылевой частицы над поверхностью спутника Марса и вариациями ее заряда, что согласуется с представлениями об аномальной диссипации, природа которой вытекает из процессов, связанных с вариацией зарядов пылевых частиц [14–17].

Для меньшей частицы с радиусом $a = 1.229$ мкм при $\theta = 87°$ имеем $h_{d0} = 882$ см, $u_{d0} = 0$, $Z_{d0} = 3202$, но колебания пылевой частицы (с периодом колебаний 390 с) над поверхностью Фобоса оказываются слабозатухающими (см. рис. 4). Такой (слабозатухающий) характер колебаний связан с тем фактом, что устойчивое положение равновесия находится на достаточно большой высоте, на которой влияние фотоэлектронов, испущенных с поверхности Фобоса, на заряд пылевой частицы оказывается малым. Соответственно, на таких больших высотах заряд пылевой частицы определяется, в основном, частицами солнечного ветра и солнечным излучением и слабо изменяется с высотой.

Характерное время t_{d0} затухания колебаний пылевой частицы можно определить как время, начиная с которого все последующие колебания зависимости $h_d(t)$ имеют максимальные значения высоты подъема пылевой частицы над поверхностью Фобоса, меньшие величины h^*, определяемой из соотношения:

$$\ln\left(\frac{h_{d,\max} - h_{d0}}{h^* - h_{d0}}\right) = 1, \tag{10}$$

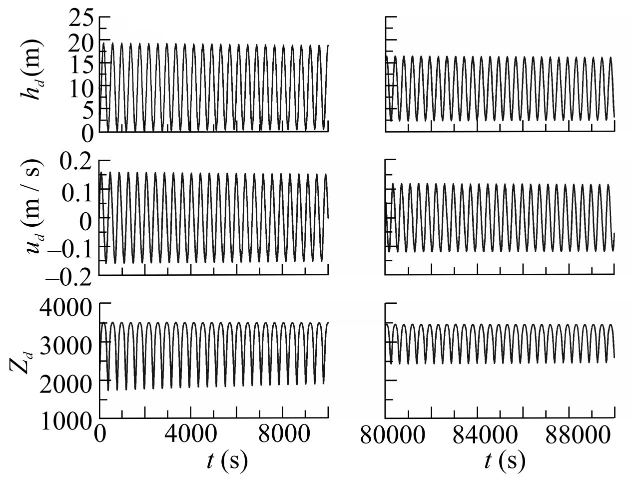

Рис. 4. Параметры, характеризующие траекторию движения пылевой частицы радиуса $a = 1.229$ мкм с изменяющимся зарядом над поверхностью Фобоса при $\theta = 87°$: высота подъема h_d, скорость u_d, зарядовое число Z_d

где $h_{d,\max}$ – максимум функции $h_d(t)$ для первого колебания. Зависимость характерного времени t_{d0} затухания колебаний пылевой частицы от ее радиуса приведена на рис. 5. Отметим, что лишь для весь-

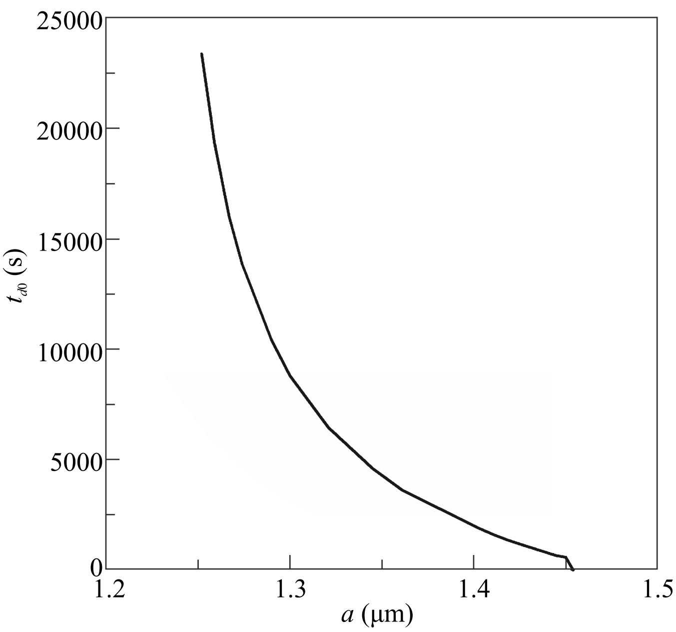

Рис. 5. Зависимость характерного времени t_{d0} затухания колебаний пылевой частицы от ее радиуса при $\theta = 87°$

ма небольшой доли размеров пылевых частиц a (от 1.41 до 1.454 мкм) $t_{d0} < 14000$ с. Это означает, что для большинства ($\sim 94\,\%$) пылевых частиц, имеющих размеры, меньшие 1.41 мкм, и поднимающихся над поверхностью Фобоса из-за фотоэлектрических и электростатических процессов, время затухания их колебаний оказывается большим продолжительности светлого времени суток, т.е. нестационарность плазменно-пылевой системы над освещенной частью поверхности Фобоса проявляется практически в течение всей продолжительности дня на Фобосе. При этом формирование пылевой плазмы за счет фотоэлектрических и электростатических процессов в приповерхностном слое над освещенной частью Фобоса происходит, как и в стационарном случае [11], для значений угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, превосходящих примерно 76°, поскольку для того, чтобы частица поднималась необходимо, чтобы электростатическая сила, отталкивающая частицу от поверхности Фобоса, превосходила гравитационную. Итак, невозможным оказывается характеризовать плазменно-пылевую систему какими-либо стационарными значениями. На рисунке 6 приведены максимальные значения вы-

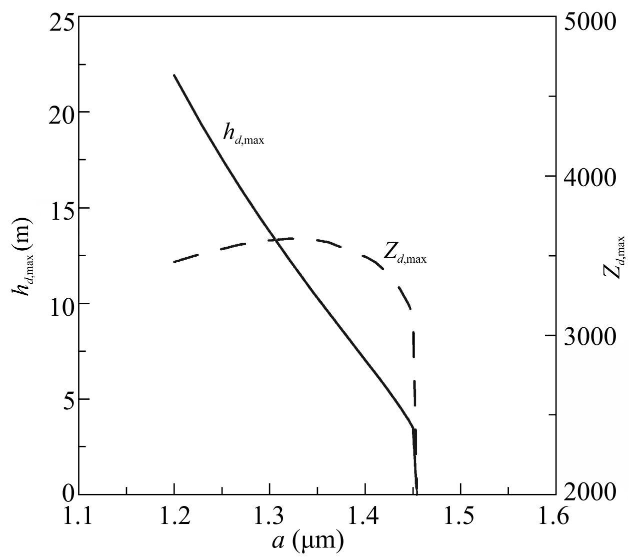

Рис. 6. Максимальные значения высоты подьема $h_{d,\max}$ и зарядового числа $Z_{d,\max}$ пылевых частиц разных размеров a над поверхностью Фобоса при $\theta = 87°$

соты подьема пылевых частиц $h_{d,\max}$ и зарядового числа $Z_{d,\max}$, которые могут быть достигнуты пылевыми частицами разных размеров a. Типичные концентрации пылевых частиц при этом составляют $\sim 10^{-2}$–10^{-1} см$^{-3}$, а фотоэлектронов – порядка 10 см$^{-3}$.

Таким образом, показано, что формирование плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над Фобосом над его освещенной частью имеет нестационарный характер практически на всем протяжении светлого времени суток. Процессы вариации зарядов пылевых частиц, приводящие к затуханию их колебаний над поверхностью Фобоса, оказываются слишком медленными по сравнению с протяженностью дня на Фобосе. При этом оказывается возможным оценить основные параметры (концентрации пылевых частиц и фотоэлектронов, заряды и высоты подъема пылевых частиц и т.д.), которые характеризуют плазменно-пылевую систему над этим спутником Марса. Для получения более определенных данных о параметрах плазменно-пылевой системы в окрестности Фобоса необходимо иметь большую информацию о свойствах грунта на Фобосе, например, такую, как работа выхода и квантовый выход вещества грунта и т.д., которые, как надеются авторы, будут получены в будущих космических миссиях.

---

1. F. Montmessin, J. L. Bertaux, E. Quemerais, O. Korablev, P. Rannou, F. Forget, S. Perriera, D. Fussend, S. Lebonnoisc, and A. Reberaca, Icarus **183**, 403 (2006).
2. F. Montmessin, B. Gondet, J. P. Bibring, Y. Langevin, P. Drossart, F. Forget, and T. Fouchet, J. Geophys. Res. **112**, 90 (2007).
3. J. A. Whiteway, L. Komguem, C. Dickinson et al. (Collaboration), Science **325**, 68 (2009).
4. P. O. Hayne, D. A. Paige, J. T. Schofield, D. M. Kass, A. Kleinbohl, N. G. Heavens, and D. J. McCleese, J. Geophys. Res. **117**, E08014 (2012).
5. A. Maattanen, C. Listowski, F. Montmessin, L. Maltagliati, A. Reberac, L. Joly, and J. L. Bertaux, Icarus **223**, 892 (2013).
6. A. A. Fedorova, F. Montmessin, A. V. Rodin, O. I. Korablev, A. Maattanen, L. Maltagliati, and J. L. Bertaux, Icarus **231**, 239 (2014).
7. O. Korablev, A. C. Vandaele, F. Montmessin et al. (Collaboration), Nature **568**, 517 (2019).
8. P. Thomas, Icarus **40**, 223 (1979).
9. P. Thomas and J. Veverka, Icarus **42**, 234 (1980).
10. A. Zakharov, M. Horányi, P. Lee, O. Witasse, and F. Cipriani, Planet. Space Sci. **102**, 171 (2014).
11. С. И. Попель, А. П. Голубь, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Письма в ЖЭТФ **106**, 469 (2017).
12. S. Soter, *The dust belts of Mars. Rep. 462, Cornell Center for Radiophysics and Space Research Physics*, Ithaca, N.Y. (1971).
13. С. И. Попель, А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, А. А. Карташева, Письма в ЖТФ **46**, 32 (2020).
14. V. N. Tsytovich and O. Havnes, Comm. Plasma Phys. Contr. Fusion **15**, 267 (1993).
15. С. И. Попель, А. П. Голубь, Т. В. Лосева, Письма в ЖЭТФ **74**, 396 (2001).
16. С. И. Попель, С. Н. Андреев, А. А. Гиско, А. П. Голубь, Т. В. Лосева, Физика плазмы **30**, 314 (2004).
17. S. I. Popel, T. V. Losseva, A. P. Golub', R. L. Merlino, and S. N. Andreev, Contrib. Plasma Phys. **45**, 461 (2005).
18. E. Walbridge, J. Geophys. Res. **78**, 3668 (1973).
19. 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).
20. 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.
21. T. V. Losseva, S. I. Popel, A. P. Golub', Yu. N. Izvekova, and P. K. Shukla, Phys. Plasmas **19**, 013703 (2012).