__ ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

УДК 533.951

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ И ЭВОЛЮЦИИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ИОНОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И МАРСА

© 2019 г. А. Ю. Дубинский^{*a*}, Ю. С. Резниченко^{*a*, *b*}, С. И. Попель^{*a*, *c*, *}

^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия ^c Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

> *e-mail: popel@iki.rssi.ru Поступила в редакцию 29.04.2019 г. После доработки 23.05.2019 г. Принята к публикации 23.05.2019 г.

Представлена самосогласованная модель формирования и эволюции плазменно-пылевых структур в ионосферах Земли и Марса. Проиллюстрировано, что в рамках данной модели удается показать образование слоистой структуры в результате эволюции пылевого облака в ионосфере Земли, обусловленной расшеплением первичного облака и характеризуемой скоплением пылевых частиц на высотах, соответствующих серебристым облакам и полярным мезосферным радиоотражениям. Характерное время формирования полярных мезосферных облаков в ионосфере Земли, полученное в рамках данной модели, соответствует результатам наблюдений. Показана возможность существования в марсианской ионосфере облаков, сформированных в пересыщенном углекислом газе и аналогичных серебристым облакам в земной ионосфере. Кроме того, показана возможность существования в ионосфере Марса явлений, аналогичных полярным мезосферным радиоотражениям на Земле. Для марсианской ионосферы получены теоретические значения характерных размеров пылевых частиц и их зарядов. Найденные теоретические значения согласуются с данными наблюдений.

DOI: 10.1134/S0367292119100044

Интерес к описанию пылевой плазмы в ионосферах планет резко возрос в 2000-е годы, что было связано, во-первых, с разработкой к этому времени методов исследования пылевой (комплексной) плазмы, в том числе, и в природных системах [1–3]. Во-вторых, в случае Земли интерес к данной тематике обусловлен возможной связью плазменно-пылевых процессов в ионосфере с климатическими изменениями и, в частности, с процессами глобального потепления [4].

Примерами плазменно-пылевых систем в ионосфере Земли являются [5–7] пылевые слои, расположенные на высотах 80–85 км и известные как серебристые облака или NLC (noctilucent clouds), и на высотах около 90 км (ответственные за полярные мезосферные радиоотражения или PMSE – Polar Mesosphere Summer Echoes). Серебристые облака состоят из субмикронных частиц водяного льда (с возможными включениями примесей) [8], их вертикальная оптическая толщина значительно меньше единицы, но на закате их можно наблюдать невооруженным глазом, в то время как слои, ответственные за полярные мезо-

сферные радиоотражения, которые, по-видимому, состоят из заряженных наномасштабных частиц, оптическими методами не наблюдаются, а проявляются как сильные радиоотражения на радарах, работающих на частотах порядка 50– 1000 МГц [9]. Сильная корреляция в наблюдениях серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений дает основания считать, что эти образования имеют одинаковое происхождение, связанное с формированием наномасштабных и субмикронных частиц в ионосфере. В литературе NLC и слои, ответственные за PMSE, часто объединяют, называя их "полярными мезосферными облаками" или PMC (Polar Mesospheric Clouds) [10].

В последнее время существенно возрос интерес к исследованиям атмосферы Марса. Успешно работают такие миссии, как Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter и др. Поверхность планеты изучается в рамках программ Mars Exploration Rover Opportunity и Mars Science Laboratory Curiosity. При этом невозможно не отметить заметное сходство атмосфер Земли и Марса, хотя

плотность и давление атмосферы на марсианской поверхности составляют около 1% от значений соответствующих параметров на Земле, а основной газовой компонентой атмосферы Марса является углекислый газ (около 95%). На высотах марсианской мезосферы вблизи 100 км, где температуры достаточно низки для замерзания углекислого газа, с помощью инфракрасного спектрометра SPICAM на космическом аппарате Mars Express [11] наблюдались облака частиц с размерами около 100 нм, напоминающие серебристые облака на Земле. К тому же с помощью спектрометра OMEGA на Mars Express наблюдались облака микрометровых частиц на высотах около 80 км [12]. Имеются области вблизи поверхности Марса, а также на высотах около 4 км, где по ночам наблюдаются облака из замерзшей воды [13]. Полярные облака расположены обычно довольно низко над поверхностью (на высоте менее 10 км) и по данным установки Mars Climate Sounder на космическом аппарате Mars Reconnaissance Orbiter представляют собой тонкие образования изо льда H₂O или CO₂ [14]. Механизмы формирования таких облаков на настоящий момент окончательно не выяснены.

Весьма активные исследования мелкодисперсных частиц в ионосфере Земли и образуемых ими структур [15–19] указывают на необходимость и своевременность дальнейшего развития методов их описания. Существенным результатом последних лет стало непосредственное наблюдение мелкодисперсных (smoke) частиц с размерами порядка 1 нм в ионосфере [15], которые могут служить центрами конденсации в ионосфере Земли. В работах [5–7] роль конденсации при формировании и эволюции NLC и PMSE детально не изучалась.

Применение плазменно-пылевых методов к описанию NLC и PMSE [5–7] позволило получить ряд важных результатов, касающихся, прежде всего, возможности применения указанных методов для описания NLC и PMSE, а также ионизационных свойств запыленной ионосферы. Что касается описания процессов в атмосфере Марса, плазменно-пылевые методы вообще не применялись. В настоящей работе предлагается самосогласованная модель формирования и эволюции мелкодисперсных частиц для описания NLC и PMSE, а также эффектов в атмосфере Марса, в которой в дополнение к процессам, описанным в [5–7], добавлено описание процессов конденсации с учетом зарядки частиц.

Частицы с характерным размером, равным нескольким нанометрам, попадают в ионосферу Земли в результате бомбардировки микрометеоритами с их последующим сгоранием на высотах 80—120 км и конденсацией метеорного вещества [20]. Концентрация таких частиц варьируется в



Рис. 1. Качественные высотные профили температуры воздуха (сплошная кривая), парциального давления паров воды (штриховая кривая) и давления насыщенных паров воды (штрих-пунктирная кривая). Пары воды пересыщены в диапазоне высот 77–94 км.

пределах 10-1000 см⁻³ в зависимости от сезона и микрометеоритной активности. В обычных условиях такие частицы практически не оказывают существенного влияния на состояние ионосферной плазмы. Ситуация кардинально меняется в летней полярной мезосфере на высотах около 80-90 км, когда температура окружающего воздуха опускается ниже 150 К и пары воды, которые присутствуют на этих высотах, становятся пересыщенными (см., например, [10]). В этих условиях происходит рост пылевых частиц и, начиная с определенного размера (и момента времени), выросшие частицы определяют ионизационные свойства ионосферы в месте своей локализации [6]. Поскольку эволюция частиц происходит в окружающей ионосферной плазме, в результате взаимодействия с плазмой частицы приобретают электрические заряды, которые сказываются на процессе их роста. Аналогичные процессы могут происходить и в атмосфере Марса с той лишь разницей, что основной газовой компонентой ионосферы Марса является углекислый газ. Таким образом, в ионосфере Марса следует рассмотреть возможности процессов конденсации и поглощения молекул как углекислого газа, так и воды пылевыми частицами с учетом наличия у последних заряда.

Рисунок 1 иллюстрирует условия в летней полярной мезосфере Земли, важные с точки зрения физики РМС. Приведены, в частности, высотные профили температуры нейтрального газа, давления насыщенных водяных паров и давления паров воды. Условия для роста (нуклеации) частиц выполняются в диапазоне высот около 77—94 км,



Рис. 2. Качественные высотные профили температуры газа ионосферы Марса (сплошная кривая), парциального давления паров углекислого газа (штриховая кривая) и давления насыщенных паров углекислого газа (штрих-пунктирная кривая). Пары углекислого газа пересыщены в диапазоне высот 87–112 км.

где пары воды пересыщены. Отметим, что именно в этом высотном диапазоне наблюдаются серебристые облака и полярные мезосферные радиоотражения.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют условия марсианской ионосферы, важные для рассматриваемых процессов. На рис. 2 представлены высотные профили температуры нейтрального газа, давления насыщенных паров углекислого газа и давления паров углекислого газа. На рис. 3 изображены аналогичные профили для случая водяного пара в ионосфере Марса. Рисунки построены на основе данных, приведенных в [21, 22]. Условия для роста (нуклеации) частиц углекислого газа выполняются в диапазоне высот около 87–112 км, где пары углекислого газа пересыщены. Частицы воды могут расти в диапазоне высот 88–116 км, где имеет место пересыщение паров воды.

При построении модели плазменно-пылевых структур в ионосферах Земли и Марса описание эволюции функции распределения пылевых частиц $f_d(h, a, v, t)$ на высоте h (ср. [6]) проводится с помощью кинетического уравнения

$$\frac{\partial f_d}{\partial t} + \frac{\alpha_{cd(w)} m_{cd(w)} v_{cd(w)}^{th} \left(n_{cd(w)} - n_{cd(w)}^s \right)}{4\rho_d} \frac{\partial f_d}{\partial a} + v \frac{\partial f_d}{\partial h} + \left(g - \frac{\pi \rho c_s a^2 F_d(v + v_{wind})}{m_d} \right) \frac{\partial f_d}{\partial v} = 0.$$
(1)

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 45 № 10 2019



Рис. 3. Качественные высотные профили температуры газа ионосферы Марса (сплошная кривая), парциального давления паров воды (штриховая кривая) и давления насыщенных паров воды (штрихпунктирная кривая). Пары воды пересыщены в диапазоне высот 88–116 км.

Здесь а — характерный линейный размер пылевой частицы, m_d – ее масса, $m_{cd(w)}$ – масса молекулы углекислого газа (воды), $\alpha_{cd(w)}$ – коэффициент аккомодации молекул углекислого газа (воды) при столкновении с пылевой частицей (обычно в пересыщенном паре $\alpha_{cd(w)} \sim 1$), $v_{cd(w)}^{th}$ – тепловая скорость молекул углекислого газа (воды), c_s – местная скорость звука, р и р_d – плотности воздуха и материала пылевой частицы соответственно, $n_{cd(w)}^{s}$ и $n_{cd(w)}$ – концентрации насыщенных паров углекислого газа (воды) над поверхностью пылевой частицы и паров углекислого газа (воды) соответственно, v_{wind} и v – вертикальные скорости ветра и частицы соответственно, F_d – коэффициент порядка единицы, отражающий влияние формы частицы, д – ускорение свободного падения. Второе слагаемое в левой части (1) описывает рост пылевых частиц в окружающем пересышенном паре углекислого газа (воды), четвертый член описывает седиментацию (подъем) пылевой частицы при взаимодействии с нейтралами (neutral drag).

Связь давления P_s насыщенных паров углекислого газа (воды) над поверхностью пылевой частицы с размером *a* и поверхностным зарядом q_d ($q_d = Z_d e$ – заряд пылевой частицы, Z_d – зарядовое число, -e – заряд электрона) с давлением P_0 насыщенного углекислого газа (воды) над плос-

~

кой поверхностью (ср. [23]) описывается уравнением

$$v_d \left(P_S - \frac{N_A \mu_D q_d}{\mu_g a^2 v_d} L \left(\frac{\mu_D q_d}{T a^2} \right) - P_0 \right) - \frac{N_A T}{\mu_g} \times \\ \times \ln \left\{ \frac{P_S}{P_0} \right\} + \frac{2\sigma v_d}{a} + \frac{q_d^2 v_d}{8\pi a^4} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 + \nu(\lambda, a) \right) = 0,$$
(2)

где

$$v(\lambda, a) = \int_{a}^{\infty} \frac{a^{2}(\lambda+r)^{2}}{r^{2}} \frac{2a \exp\{2(a-r)/\lambda\}}{\lambda(\lambda+a)^{3}} dr.$$
 (3)

Здесь λ – характерная длина экранирования потенциала Юкавы, характеризующая электрическое поле пылевой частицы, є – диэлектрическая проницаемость материала частицы, v_d – удельный объем пылевой частицы, N_A – число Авогадро, µ_D – дипольный момент молекулы углекислого газа (воды), μ_g – молярная масса паров углекислого газа (воды), T – температура, L(x) – функция Ланжевена, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Решение уравнения (2) позволяет определить $n_{cd(w)}^{s}$ посредством соотношения для идеального газа ($n_{cd(w)}^s = P_S/T$). Уравнение (2) было получено путем минимизации термодинамического потенциала Ω [24] системы, состоящей из заряженной пылевой частицы, на поверхности которой находятся сконденсированные молекулы углекислого газа (воды), прилегающего газового слоя указанных молекул, электрического поля внутри и вне пылевой частицы. Было использовано предположение, что электрическое поле вне пылевой частицы описывается потенциалом Юкавы (появление члена, содержащего $v(\lambda, a)$, в (2)), а также учтено действие сил поверхностного натяжения.

Динамика паров углекислого газа (воды) описывается следующим уравнением для их концентрации $n_{cd(w)}$:

$$\frac{\partial n_{cd(w)}}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_{cd(w)}}{\partial h} = P_{cd(w)} - n_{cd(w)}L_{cd(w)} - \pi\alpha_{cd(w)}v_{cd(w)}^{th}n_{cd(w)}\langle a^2n_d \rangle,$$
(4)

где $\Gamma_{cd(w)}$ — вертикальный диффузионный поток паров углекислого газа (воды) [25], $P_{cd(w)}$, $L_{cd(w)}$ фотохимические источники и стоки паров углекислого газа (воды) в ионосфере, последнее слагаемое в правой части (4) описывает поглощение молекул углекислого газа (воды) пылевыми частицами.

Описание невозмущенной заряженной компоненты ионосферы дается по аналогии с [6]. При этом все положительные ионы разбиваются на две группы. В первую входят простые, первичные ионы. Во вторую группу входят кластерные, протон-гидратные ионы. Перенос солнечного излучения в ионосфере рассчитывается с учетом реальных зенитных углов в данный сезон [5].

Система уравнений, описывающих влияние пылевых частиц на динамику заряженных частиц в ионосфере, записывается в локальном приближении, использование которого оправдано, поскольку характерные времена зарядки пылевых частиц в ионосфере Земли и Марса значительно меньше характерных времен их переноса. Система уравнений включает в себя уравнения непрерывности [5] для концентрации электронов n_e , концентрации первичных n_i^s и кластерных n_i^c ионов, а также для заряда пылевой частицы Z_d^a радиуса a:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec}^s n_e n_i^s - \alpha_{rec}^c n_e n_i^c + L_{photo}^e - L_{dust}^e, \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_i^s}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec}^s n_e n_i^s - \beta_c n_i^s - L_{dust}^s, \tag{6}$$

$$\frac{\partial n_i^c}{\partial t} = \beta_c n_i^s - \alpha_{rec}^c n_e n_i^c - L_{dust}^c, \tag{7}$$

$$\frac{\partial Z_d^a}{\partial t} = q_{photo} + v_s + v_c - v_e. \tag{8}$$

Здесь L_{dust}^{j} (j = e, s, c) – слагаемые, описывающие гибель электронов, простых и кластерных ионов на пылевых частицах, причем $L_{dust}^{j} = \int v_{j} dn_{d}$ (учитывается распределение dn_{d} микрочастиц по размерам, $n_{d} = \int f_{d} dv da$), слагаемое L_{photo}^{e} описывает рождение фотоэлектронов при поглощении солнечного излучения частицами, $L_{photo}^{e} = \int q_{photo} dn_{d}$, а слагаемые v_{e}, v_{s}, v_{c} описывают скорости зарядки, обусловленные столкновениями электронов и ионов (простых и кластерных) с пылевыми частицами. Слагаемое q_{photo} описывает скорость ионизации, вызванную фотоэффектом, β_{c} – скорость конверсии простых и ионов в кластерные.

Отметим, что в ионосфере коагуляцией пылевых частиц при их столкновениях друг с другом можно пренебречь. Характерное время τ_{coag} такого процесса значительно превышает все осталь-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 45 № 10 2019



Рис. 4. Эволюция слоев в ионосфере Земли, составляющих начальный прямоугольный профиль концентрации частиц водяного льда, в зависимости от высоты для различных моментов времени (t = 0 (a), 2 (б), 4 (в), 6 (г), 8 (д), 10 ч (е)). Начальный радиус пылевых частиц составляет 4.5 нм (отмечено мелкими черными точками на столбцах, характеризующих слои пылевых частиц) и 45 нм (отмечено крупными черными точками на столбцах). Концентрация частиц пыли каждого размера в каждом слое равна $n_d = 100$ см⁻³. Видно (е) расщепление первичного облака и скопление в результате эволюции пылевых частиц на высотах выше 90 км и в слое 81-85 км, соответствующих PMSE и NLC.

ные значимые характерные времена: $\tau_{coag} \sim (n_d v \pi a^2)^{-1} \ge 10^6$ с.

Для вычисления микроскопических токов электронов и ионов на микрочастицы используется зондовая модель (orbit-limited probe model) [26, 27], в рамках которой сечения взаимодействия ионов и электронов с заряженной частицей определяются из законов сохранения момента импульса и энергии. Если пылевые частицы заряжены отрицательно, то зондовое приближение приводит к следующим выражениям для скоростей зарядки:

$$v_e \approx \pi a^2 \left(\frac{8T_e}{\pi m_e}\right)^{1/2} n_e \exp\left(\frac{eq_d}{aT_e}\right),$$
$$v_i \approx \pi a^2 \left(\frac{8T_i}{\pi m_i}\right)^{1/2} n_i \left(1 - \frac{eq_d}{aT_i}\right).$$

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 45 № 10 2019

Для положительно заряженных пылевых частиц выражения для v_e , v_i принимают вид

$$v_e \approx \pi a^2 \left(\frac{8T_e}{\pi m_e}\right)^{1/2} n_e \left(1 + \frac{eq_d}{aT_e}\right),$$
$$v_i \approx \pi a^2 \left(\frac{8T_i}{\pi m_i}\right)^{1/2} n_i \exp\left(-\frac{eq_d}{aT_i}\right).$$

Здесь T_e, T_i – температуры электронов и ионов соответственно, m_{α} – масса частицы сорта α . Скорость ионизации, ассоциированная с фотоэффектом q_{photo} , определяется потоком солнечного излучения $F(\lambda)$

$$q_{photo} \approx \pi r^2 \int_{0}^{\lambda^*} Q_{abs}(a, m(\lambda)) F(\lambda) Y(\lambda) d\lambda, \qquad (9)$$



Рис. 5. Эволюция слоев в ионосфере Марса, составляющих начальный прямоугольный профиль концентрации частиц пыли, состоящих изо льда CO_2 , в зависимости от высоты для различных моментов времени (t = 0 (a), 40 (б), 120 (в), 200 (г), 240 (д), 280 с (е)). Начальный радиус пылевых частиц составляет 4.5 нм. Концентрация частиц пыли в каждом слое равна $n_d = 100$ см⁻³. Во время эволюции слои перекрываются. Первоначально два нижних слоя перекрываются (б). Позже перекрываются все слои (в)–(е). Поскольку перекрытие слоев от (в) до (е) оказывается значительным, столбцы, характеризующие слои, расширяются вдоль оси абсцисс.

где Q_{abs} — сечение поглощения фотона, $m(\lambda)$ = $= n(\lambda) + ik(\lambda) -$ комплексный показатель преломления материала пылевой частицы, $F(\lambda)$ – поток солнечного излучения. λ^* — максимальная длина волны фотона, приводящая к фотоэффекту, $Y(\lambda)$ – вероятность фотоэффекта. Зависимость Y от длины волны λ достаточно сложная. Обычно используется зависимость Фаулера-Нордхайма [28] $Y(\lambda) = C(W - 2\pi\hbar c/\lambda)^2$, где коэффициент C обычно варьируется в пределах 10^{-2} — 10^{-4} эВ⁻² и зависит от размера и состава пылевой частицы [29]. Отметим, что фотоэффект может быть существенен для достаточно крупных частиц. Для частиц с размером в несколько нанометров эффективность фотоэффекта мала из-за сильного уменьшения ($\propto a^3$) сечения поглощения Q_{abs} для $a \ll \lambda$.

Пределы интегрирования в (9) определяются из условия, что только фотоны с энергиями $2\pi\hbar c/\lambda - W - (e^2 Z_d/a)$ приводят к рождению фотоэлектронов. В рассматриваемом случае энергия фотона составляет несколько эВ, в то время как равновесный потенциал заряженной частицы имеет порядок [6] $T_e/e \approx T_n/e$, где $T_n \approx 0.03$ эВ – температура нейтралов в мезосфере, и, соответственно, $e^2 |Z_d|/a \sim kT_e \approx 0.01$ эВ $\ll 2\pi\hbar c/\lambda$. Таким образом, можно пренебречь зависимостью фототока электронов от заряда пылевой частицы.

Обсудим на ряде частных примеров результаты, полученные в рамках изложенной выше модели. На рис. 4 для ионосферы Земли, а также рис. 5, 6 для ионосферы Марса приведены примеры рассмотрения эволюции слоев пылевых частиц, составляющих начальный прямоугольный



Рис. 6. Эволюция слоев в ионосфере Марса, составляющих начальный прямоугольный профиль концентрации частиц водяного льда, в зависимости от высоты для различных моментов времени (t = 0 (a), 4 (б), 8 (в), 12 (г), 16 (д), 20 ч (е)). Начальный радиус пылевых частиц составляет 4.5 нм. Концентрация частиц пыли в каждом слое равна $n_d = 100$ см⁻³.

профиль концентрации. Рисунок 4 для Земли и рис. 6 для Марса соответствуют случаям конденсации паров воды, тогда как рис. 5 представлен для случая конденсации паров углекислого газа в ионосфере Марса. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие общие выводы относительно образования и эволюции пылевых структур в земной и марсианской ионосфере.

1. В рамках представленной модели удается показать, например, для модельного достаточно тонкого (по высотам) начального прямоугольного профиля концентрации частиц водяного льда в ионосфере Земли, что в результате эволюции образуется слоистая структура, обусловленная расщеплением первичного слоя пыли и скоплением в результате эволюции пылевых частиц на высотах, соответствующих NLC и PMSE. Характерное время формирования NLC и PMSE составляет, согласно расчетам, несколько часов, что соответствует данным наблюдений. углекислого газа частицы, находящиеся изначально в верхней области зоны конденсации (зоны, где пары углекислого газа пересыщены), поглощают большую часть углекислого газа и начинают седиментировать. Вследствие неодинаковости начального расположения различные слои поглощают разное количество газа, что создает возможность для перемешивания слоев друг с другом и образования пылевых облаков. В зоне конденсации пылевые частицы могут достигать размеров порядка 100 нм. Это теоретическое значение соответствует наблюдениям, полученным Mars Express с помощью инфракрасного спектрометра SPICAM [11]. Возможные значения приобретаемого частицей заряда составляют соответственно $q_d \sim -10e$ в ночное время и $q_d \sim 100e$ в дневное время. Характерное время осаждения таких облаков в зоне конденсации составляет около нескольких минут. Ниже зоны конденсации

2. В ионосфере Марса в случае конденсации

сконденсировавшийся углекислый газ испаряется. В связи с этим, характерное время седиментации слоев через зону конденсации определяет характерное время существования пылевых облаков аналогично серебристым облакам на Земле.

3. Необходимо отметить возможность существования в марсианской ионосфере над зоной конденсации частиц, характерный размер которых составляет несколько нанометров, вследствие бомбардировки планеты микрометеоритами (аналогично ситуации на Земле [20]). Те частицы, которые изначально были расположены выше верхней границы зоны конденсации, не могут существенно увеличиваться в размерах из-за малого количества пересыщенного углекислого газа в этой зоне. Подобные мелкие частицы существуют на высотах от 112 до 115 км в течение часов и могут привести к явлениям в марсианской атмосфере, аналогичным полярным мезосферным радиоотражениям на Земле.

4. В случае конденсации водяных паров в ионосфере Марса пылевые частицы растут очень медленно и седиментируют в зоне конденсации в течение часов. Разные слои таких частиц в данном случае не смешиваются друг с другом, а максимальные значения их размеров совпадают по порядку величины с начальными. Причиной подобного поведения являются очень низкие значения концентрации водяного пара в марсианской ионосфере. Данные факты объясняют отсутствие наблюдений пылевых облаков, состоящих из водяного льда, на высотах 88–116 км.

Таким образом, представлена самосогласованная модель пылевой плазмы в ионосферах Земли и Марса. Проиллюстрировано, что в рамках данной модели удается показать, что в результате эволюции пылевого облака в ионосфере Земли образуется слоистая структура, обусловленная расщеплением первичного облака и характеризуемая скоплением пылевых частиц на высотах, соответствующих серебристым облакам и полярным мезосферным радиоотражениям. Характерное время формирования полярных мезосферных облаков в ионосфере Земли, полученное в рамках данной модели, соответствует результатам наблюдений. Показана возможность сушествования в марсианской ионосфере облаков, сформированных в пересыщенном углекислом газе и аналогичных серебристым облакам в земной ионосфере. Кроме того, показана возможность существования в марсианской атмосфере явлений, аналогичных полярным мезосферным радиоотражениям на Земле. Для марсианской ионосферы получены теоретические значения характерных размеров пылевых частиц и их зарядов. Найденные теоретические значения согласуются с данными наблюдений.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-00341-а), а также в рамках крупного проекта Минобрнауки КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Shukla P.K., Mamun A.A.* Introduction to Dusty Plasmas Physics. Bristol/Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2002.
- Tsytovich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H. Elementary Physics of Complex Plasmas. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.
- 3. Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapak A.G., Morfill G.E. // Phys. Reports. 2005. V. 421. P. 1.
- Popel S.I., Kopnin S.I., Yu M.Y., Ma J.X., Huang F. // J. Phys. D: Applied Phys. 2011. V. 44. P. 174036.
- 5. *Klumov B.A., Popel S.I., Bingham R. //* Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. С. 524.
- 6. Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. С. 171.
- 7. Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Владимиров С.В. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. С. 714.
- 8. von Zahn U., Baumgarten G., Berger U., Fiedler J., Hartogh P. // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4. P. 2449.
- Cho J. Y.N., Röttger J. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 2001.
- 10. Gadsden M., Schröder W. Noctilucent Clouds. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- Montmessin F., Bertaux J.L., Quémerais E., Korablev O., Rannou P., Forget F., Perriera S., Fussend D., Lebonnoisc S., Rébéraca A. // Icarus. 2006. V. 183. P. 403.
- Montmessin F., Gondet B., Bibring J.P., Langevin Y., Drossart P., Forget F., Fouchet T. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. E11S90.
- Whiteway J.A., Komguem L., Dickinson C., Cook C., Illnicki M., Seabrook J., Popovici V., Duck T.J., Davy R., Taylor P.A., Pathak J., Fisher D., Carswell A.I., Daly M., Hipkin V., Zent A.P., Hecht M.H., Wood S.E., Tamppari L.K., Renno N., Moores J.E., Lemmon M.T., Daerden F., Smith P. // Science. 2009. V. 325 (5936). P. 68.
- Hayne P.O., Paige D.A., Schofield J.T., Kass D.M., Kleinböhl A., Heavens N.G., McCleese D.J. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. E08014.
- Amyx K., Sternovsky Z., Knappmiller S., Robertson S., Horanyi M., Gumbel J. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 61.
- Kaifler N., Baumgarten G., Fiedler J., Latteck R., Lübken F.-J., Rapp M. // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2010. V. 10. P. 25081.
- Mahmoudian A., Scales W.A. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. A02304.
- Kaifler N., Baumgarten G., Klekociuk A.R., Alexander S.P., Fiedler J., Lübken F.-J. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 104. P. 244.
- Robertson S., Dickson S., Horányi M., Sternovsky Z., Friedrich M., Janches D., Megner L., Williams B. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 118. P. 161.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 45 № 10 2019

- 20. Turco R.P., Toon O.B., Whitten R.C., Keesee R.G., Hollenbach D. // Planet. Space Sci. 1982. V. 30. P. 1147.
- Forget F., Montmessin F., Bertaux J.L., González-Galindo F., Lebonnois S., Quémerais E., Reberac A., Dimarellis E., López-Valverde M.A. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. 01004.
- 22. Fox J.L., Benna M., Mahaffy P.R., Jakosky B.M. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8977.
- 23. Дубинский А.Ю., Попель С.И. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 22.
- 24. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976.

- 25. *Murray B.J., Plane J.M.C.* // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 1027.
- Chen F.F. // Plasma Diagnostic Techniques / Ed. by R.H. Huddlestone and S.L. Leonard. New York: Academic, 1965. Ch. 4.
- 27. Barnes M.S., Keller J.H., Forster J.C., O'Neill J.A., Coultas D.K. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 313.
- Feuerbacher B., Fitton B. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 1563.
- 29. Schmitt-Ott A., Schurtenberger P., Siegmann H.C. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 1284.