

## ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВАЯ СИСТЕМА В МАРСИАНСКОЙ ИОНОСФЕРЕ<sup>1</sup>

© 2023 г. Ю. С. Резниченко<sup>a, \*</sup>, А. Ю. Дубинский<sup>b</sup>, С. И. Попель<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup> Московский физико-технический институт (научно-исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>b</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*e-mail: dvju@yandex.ru

\*\*e-mail: popel@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 30.07.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Представлена теоретическая модель, описывающая возможный механизм формирования и эволюции плазменно-пылевых облаков, зафиксированных в марсианской ионосфере аппаратом Mars Science Laboratory Curiosity в марте 2021 г. Модель описывает, в частности, седиментацию пылевых частиц в пересыщенных парах углекислого газа, рост пылевых зародышей за счет нуклеации углекислого газа, процессы зарядки пылевых частиц, а также временные изменения электронной и ионной концентраций ионосферной плазмы. Показано, что в рамках данной модели оказывается возможным проиллюстрировать образование слоистой структуры пылевого облака, характерное время седиментации которого составляет несколько минут. Рассчитаны характерные размеры пылевых частиц, соответствующие результатам измерений. Кроме того, рассчитаны характерные заряды пылевых частиц в случаях наличия и отсутствия фотоэффекта. Показано, что при отсутствии фотоэффекта пылевые частицы приобретают отрицательный заряд и, кроме того, наблюдается понижение концентраций ионов и электронов плазмы. В случае наличия фотоэффекта частицы с металлическими примесями несут на себе положительный заряд, концентрация электронов плазмы при этом повышается при сохранении понижения ионной концентрации.

**Ключевые слова:** пылевая плазма, пылевые структуры, пылевые частицы, ионосфера, Марс, процессы зарядки

**DOI:** 10.31857/S0367292122600960, **EDN:** VGOCBM

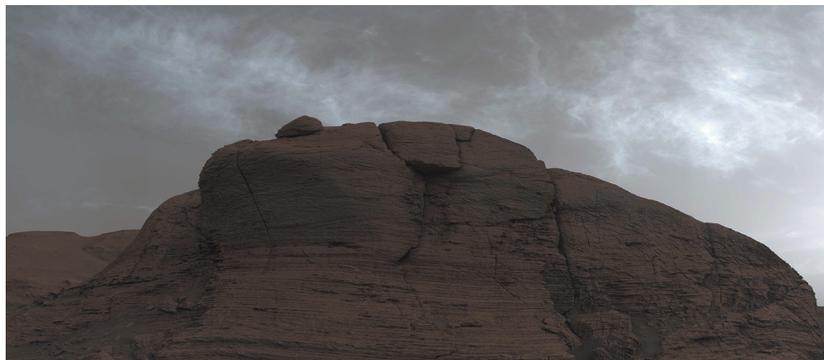
### 1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 1990-х–начале 2000-х все больше и больше внимания стало уделяться исследованиям и описанию пылевой плазмы в ионосферах планет. Связано это, во-первых, с тем, что к этому моменту времени было разработано достаточное количество разнообразных методов описания пылевой плазмы (во многом благодаря лабораторным исследованиям) и стало возможным применить наработанные методы к изучению плазмы, встречающейся в различных природных системах [1–3]. Во-вторых, результаты, полученные в ходе исследования природной комплексной плазмы, могут быть полезны для таких смежных дисциплин как физика атмосферы, экология, геофизика. В случае с Землей, к тому же, нельзя исключать взаимосвязь плазменно-пылевых ионосферных явлений с разного рода климатиче-

скими изменениями, например, с процессами глобального потепления [4].

На Земле яркий пример пылевых слоев плазменного происхождения – “полярные мезосферные облака” (polar mesospheric clouds – PMC) [5–7]. Это обобщенное название для двух типов плазменно-пылевых слоистых структур, имеющих ряд общих черт, – серебристых облаков (NLC) и полярных мезосферных радиоотражений (PMSE). Данные атмосферные явления регистрируются в летнее время года на мезосферных высотах (около 80–85 км) высоких и средних широт, причем появления серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений очевидным образом коррелируют друг с другом. Все это дает основание предположить, что принципиальное происхождение NLC и PMSE одинаково. Следует, однако, отметить наличие и некоторых отличий в указанных явлениях. Так, типичный размер частиц NLC составляет несколько сотен нанометров, максимальный же размер не превышает одного микрона. Эти частицы в основном состоят из льда, однако возможно наличие при-

<sup>1</sup> Доклад “Dusty plasma system in the Martian ionosphere” сделан на 9th Internat. Confer. on the Physics of Dusty Plasmas (Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, May 23–27, 2022).



**Рис. 1.** Марсианские облака, снятые Mars Science Laboratory Curiosity в марте 2021 г. Облака расположены на высотах, больших 60 км, и, скорее всего, состоят из частиц сухого льда.

месей, в том числе металлических [8]. Важной характерной особенностью серебристых облаков является возможность их наблюдения на закате невооруженным глазом.

PMSE, в отличие от NLC, никакими оптическими методами не детектируются, их регистрация является косвенной: полярные мезосферные радиоотражения обнаруживаются в виде сильных радиоотражений на радарах, чья частота работы находится в диапазоне от 50 до 1000 МГц [9]. Эти облака располагаются выше, чем NLC, на высотах от 80 до 95 км. Характерный размер заряженных частиц PMSE составляет, скорее всего, около нанометра [10].

В последние два десятилетия имеет место существенный рост интереса к исследованиям Марса. Важное достижение экспериментальных миссий – построение температурного профиля марсианской атмосферы, а также профиля паров углекислого газа. В рамках программ Mars Exploration Rover Opportunity и Mars Science Laboratory Curiosity проводятся исследования поверхности планеты. Атмосфера Марса успешно изучается миссиями Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter и др. Так, инфракрасный спектрометр SPICAM (установлен на космическом аппарате Mars Express [11]) зарегистрировал на высотах около 100 км облака, состоящие из частиц с характерным размером около 100 нм. Отметим, что на данных высотах температура нейтрального газа атмосферы достаточно низкая для того, чтобы стала возможной десублимация паров углекислого газа. На более низких высотах (около 80 км над поверхностью планеты) миссией Mars Express с помощью спектрометра OMEGA были обнаружены облака, состоящие из микрометровых частиц [12]. Детектировались облака и непосредственно над поверхностью планеты, а также на высотах около 4 км [13]. В этих областях по ночам наблюдались тонкие пылевые слои, состоящие, по данным установки Mars Climate Sounder (аппарат Mars

Reconnaissance Orbiter), из замерзших частиц льда  $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}$  [14]. Точные механизмы образования подобных облаков пока еще до конца не выяснены.

В марте 2021 г. аппарат Mars Science Laboratory Curiosity прислал на Землю снимки марсианских облаков, состоящих, судя по всему, из частиц сухого льда. Эти облака были зарегистрированы на высотах, больших 60 км, причем фотосъемка проводилась на закате, когда солнечные лучи освещали поверхность пылевых частиц и подсвечивали облака на фоне темного неба. Подобное поведение, очевидно, аналогично тому, что известно о земных серебристых облаках. На рис. 1 представлены фотографии, полученные ровером Curiosity [15].

Ранее в [5, 6] и [16] была представлена самосогласованная модель, описывающая динамику заряженной компоненты ионосферной плазмы, процессы зарядки и седиментации пылевых частиц летней ионосферы Земли, а также возможный механизм образования слоистой структуры серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений. В настоящей работе данная модель адаптируется к условиям атмосферы Марса с целью описания формирования и эволюции плазменно-пылевых облаков марсианской ионосферы, обнаруженных космическими миссиями. Кроме того, в работе рассматривается влияние пылевых частиц на электронную и ионную компоненты марсианской ионосферы и определяют характерные значения зарядов и размеров пылевых частиц.

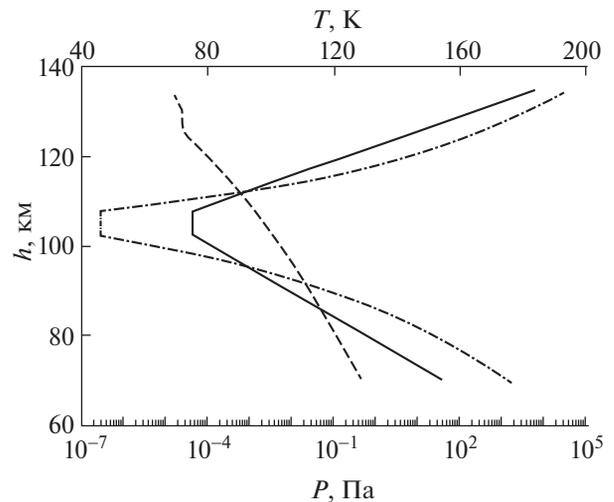
## 2. УСЛОВИЯ В ИОНОСФЕРЕ МАРСА

Пылевые частицы в марсианской атмосфере могут присутствовать вплоть до высот около 100 км над поверхностью планеты, однако концентрации атмосферных пылевых частиц, как правило, невелики [17]. Это связано с тем, что

марсианская атмосфера является существенно более разреженной по сравнению с земной (давление и плотность марсианской атмосферы у поверхности планеты составляют всего около одного процента от соответствующих земных значений), и поэтому она оказывается неспособной удерживать пылевые частицы в течение долгого времени. Высокие концентрации пылевых частиц регистрируются, например, во время пылевых бурь или других явлений, в результате которых оказывается возможным поднятие частичек реголита с поверхности Марса. Кроме того, значения концентраций пылевых частиц быстро убывают с ростом высоты, достигая своего максимума непосредственно у поверхности планеты.

Характерный размер крупных частиц марсианской ионосферы составляет по порядку около микрометра, значение концентрации таких частиц лежит в пределах  $0.01\text{--}1\text{ см}^{-3}$ . Мелкие пылевые частицы имеют характерный размер около 44 нм, они наблюдались спектрометром SPICAM на достаточно низких высотах (преимущественно около 30–40 км в северном полушарии, примерно до 70 км в южном полушарии), их пиковые концентрации ( $10^4\text{--}10^5\text{ см}^{-3}$ ) регистрировались на высоте около 20 км, в дальнейшем концентрации падали до  $1\text{--}5\text{ см}^{-3}$  на высотах около 60–70 км. Для сравнения в ионосфере Земли характерные размеры пылевых зародышей составляют несколько нанометров, типичное значение концентрации зародышей лежит в пределах  $10\text{--}1000\text{ см}^{-3}$ .

Наличие частиц пыли, сухого льда или замерзшей воды не оказывает какого бы то ни было существенного влияния на эволюцию ионосферной плазмы в обычных условиях. Однако в случаях, когда атмосферные газы по тем или иным причинам становятся сильно пересыщенными, ситуация меняется. Наличие пересыщенных паров приводит к интенсивному росту пылевых зародышей за счет бурной конденсации атмосферных газов, в результате чего частицы по достижении определенного размера начинают определять ионизационные свойства планетной ионосферы в месте своей локализации [6]. В процессе роста частицы взаимодействуют с ионами и электронами окружающей ионосферной плазмы, приобретая таким образом некоторый заряд. Наличие у частицы заряда, в свою очередь, в дальнейшем сказывается на их росте. На Земле подобное имеет место на высотах около 80–90 км в летней полярной мезосфере. Здесь уменьшение температуры окружающего воздуха до 150 К и ниже приводит к тому, что водяной пар, присутствующий в земной ионосфере, становится пересыщенным (см., например, [10]). Аналогичная ситуация может возникнуть и в марсианской ионосфере, однако основной газовой компонентой атмосферы Марса (около 95%) является углекислый газ, по-



**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). Видно, что в диапазоне высот 87–112 км пары углекислого газа пересыщены, т.е. выполнены условия роста пылевых зародышей. Примерно на этих высотах в марте 2021 года Mars Science Laboratory Curiosity сделал снимки слоистых структур, напоминающих серебристые облака на Земле.

этому в случае с ионосферой Марса необходимо рассматривать рост частиц за счет конденсации пересыщенных паров  $\text{CO}_2$  (концентрации паров воды на Марсе столь низки, что не могут привести к существенному росту пылевых зародышей [18, 19]).

На рис. 2 проиллюстрированы условия в марсианской ионосфере, важные для физики рассматриваемых процессов. Здесь приведены высотные профили температуры нейтрального газа, давления насыщенных паров углекислого газа и давления паров углекислого газа. Экспериментальные данные по температуре атмосферы и парам углекислого газа были взяты из [20, 21]. При вычислении давления насыщенных паров углекислого газа использовался аппроксимационный полином, взятый из [22]. Условия роста пылевых зародышей выполнены в диапазоне высот 87–112 км, где пары углекислого газа сильно пересыщены.

Кроме того, для описания динамики ионосферной плазмы необходимо знать освещенность атмосферы солнечным излучением. Солнечное излучение, приводя к ряду фотохимических реакций, представляет собой один из источников электронов и ионов плазмы. Для данной работы, однако, главным является то обстоятельство, что солнечное излучение может приводить к фотоэффекту на поверхности пылевых частиц, благодаря

чему, во-первых, возможно приобретение частицей положительного заряда, а, во-вторых, происходит появление дополнительного источника электронов плазмы (фототока).

В ряде работ (см., например, [23, 24]) проводились расчеты солнечных спектров на поверхности планеты. Эти спектры могут быть использованы в качестве нижней оценки спектров в ионосфере Марса, однако такая оценка довольно сильно занижена. В [25, 26] были представлены коэффициенты пропускания марсианской атмосферы для различных тангенциальных высот. Эти коэффициенты были рассчитаны на основе экспериментальных данных, полученных спектрометром SPICAM. Ионосферный спектр солнечного излучения, таким образом, может быть определен через внеатмосферный спектр с использованием коэффициента пропускания атмосферы для соответствующей высоты. Согласно [25, 26] на высоте в 100 км коэффициент пропускания марсианской атмосферы для длин волн, меньших 165 нм, приблизительно равен нулю, а для больших длин волн равен единице. Следует, однако, подчеркнуть, что SPICAM проводил свои измерения в режиме затмения, поэтому коэффициент является несколько заниженным. Тем не менее, оценка солнечного спектра, получаемая с помощью коэффициента пропускания для тангенциальной высоты, лучше, чем оценка, даваемая поверхностным спектром (поверхностная оценка дает обрезание спектра примерно на 200 нм). Итак, в данной работе было использовано приближение, согласно которому солнечный спектр в марсианской ионосфере для длин волн, больших 165 нм, равен внеатмосферному, а для длин волн, меньших 165 нм, равен нулю. Внеатмосферный солнечный спектр определялся согласно [27].

Отдельное внимание следует уделить вопросу, касающемуся присутствия в ионосфере Марса металлических паров. Возможность существования в марсианской ионосфере металлических слоев метеорного происхождения обсуждалась уже давно, непосредственно металлические слои были зарегистрированы несколько лет назад в диапазоне высот приблизительно от 80 до 110 км (заметим, что это как раз та область, где пересыщен углекислый газ) спектрометром NGIMS, установленном на борту аппарата MAVEN.

Согласно полученным экспериментальным данным [28] основными чистыми веществами в таких слоях являются магний и железо, хотя присутствуют и некоторые другие металлы. Концентрации металлов в слоях невелики: в среднем концентрации ионов магния равны  $250 \text{ см}^{-3}$ , пиковые значения — примерно  $350\text{--}400 \text{ см}^{-3}$ , возможно, до  $1000 \text{ см}^{-3}$  (для сравнения на Земле пиковые концентрации паров железа достигают значений  $\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ ). В отдельных случаях, одна-

ко, оказывается возможным заметное повышение ионосферных концентраций металлических паров. Так, например, в октябре 2014 г. Марс сильно сблизился с быстро летящей (около  $54 \text{ км/ч}$ ) кометой C/2013 A1 (Siding Spring), и вскоре после максимального сближения (по достижении Марса пылевого облака от кометы) был зарегистрирован подскок концентраций металлов до  $\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ см}^{-3}$  (см., например, [29]).

Таким образом, в отдельных случаях оказывается возможным говорить о наличии в химическом составе ионосферы Марса заметного количества металлов и, как следствие, о наличии металлических примесей в пылевых частицах. Именно этот случай и будет в дальнейшем рассматриваться в настоящей работе, работа выхода материала частицы при этом будет приниматься равной  $4 \text{ эВ}$ .

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Используемая в настоящей работе теоретическая модель плазменно-пылевых образований описывает седиментацию и зарядку пылевых частиц, рост пылевых зародышей за счет конденсации пересыщенных паров углекислого газа, а также изменения состава электронно-ионной подсистемы ионосферы, вызванные влиянием пылевых частиц.

Описание механики пылевых частиц включает в себя уравнения, описывающие увеличение масс и радиусов пылевых частиц за счет конденсации пересыщенных паров углекислого газа, динамическое уравнение движения тела с переменной массой, а также кинематическое уравнение движения пылевой частицы

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_{cd} \pi a^2 m_{cd} v_{cd}^{th} (n_{cd} - n_{cd}^s), \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{\alpha_{cd} m_{cd} v_{cd}^{th} (n_{cd} - n_{cd}^s)}{4\rho_d}, \quad (2)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -v \alpha_{cd} \pi a^2 m_{cd} v_{cd}^{th} (n_{cd} - n_{cd}^s) + (mg - \pi \rho c_s a^2 F_d (v + v_{wind})), \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = -v. \quad (4)$$

Здесь  $a$  — характерный линейный размер пылевой частицы,  $m_d$  — ее масса,  $m_{cd}$  — масса молекулы углекислого газа,  $\alpha_{cd}$  — коэффициент аккомодации молекул углекислого газа при столкновении с пылевой частицей (обычно в пересыщенном паре  $\alpha_{cd} \sim 1$ ),  $v_{cd}^{th}$  — тепловая скорость молекул углекислого газа,  $c_s$  — местная скорость звука,  $\rho$  и  $\rho_d$  — плотности воздуха и материала пылевой частицы,

$n_{cd}^s$  и  $n_{cd}$  – концентрации насыщенных паров углекислого газа над поверхностью пылевой частицы и паров углекислого газа,  $v_{wind}$  и  $v$  – вертикальные скорости ветра и частицы соответственно,  $F_d$  – коэффициент порядка единицы, отражающий влияние формы частицы,  $g$  – ускорение свободного падения. Концентрация насыщенных паров углекислого газа  $n_{cd}^s$  может быть определена посредством соотношения для идеального газа  $n_{cd}^s = P_S/T$ .

Динамика паров углекислого газа описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial n_{cd}}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_{cd}}{\partial h} = P_{cd} - n_{cd}L_{cd} - \pi\alpha_{cd}v_{cd}^{th}n_{cd}\langle a^2n_d \rangle, \quad (5)$$

где  $\Gamma_{cd}$  – вертикальный диффузионный поток паров углекислого газа,  $P_{cd}$ ,  $L_{cd}$  – фотохимические источники и стоки паров углекислого газа в марсианской ионосфере, а последнее слагаемое в правой части (5) описывает поглощение молекул углекислого газа пылевыми частицами.

Описание влияния пылевых частиц на динамику заряженной компоненты ионосферы проводится с помощью системы уравнений, состоящей из трех уравнений непрерывности [5] и записывающейся в локальном приближении (такое приближение является допустимым, так как в марсианской ионосфере зарядка пылевых частиц происходит существенно быстрее, чем их перенос). Данная система имеет вид

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec}n_en_i + L_{photo}^e - L_{dust}^e, \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec}n_en_i - L_{dust}^i, \quad (7)$$

$$\frac{\partial Z_d^a}{\partial t} = q_{photo} + v_i - v_e, \quad (8)$$

где  $n_i$ ,  $n_e$  – концентрации ионов и электронов соответственно, а  $Z_d^a$  – заряд пылевой частицы с эффективным радиусом  $a$ .

Здесь слагаемые  $L_{dust}^j$  ( $j = e, i$ ) описывают потери заряженных частиц ионосферной плазмы (ионов и электронов) за счет натекания на пылевые частицы с учетом распределения микрочастиц  $n_d^a$  по размерам,  $L_{dust}^j = \sum_a v_j^a n_d^a$ . Слагаемое  $L_{photo}^e$  отвечает за появление электронов фототока в результате фотоэффекта на поверхности пылевых частиц,  $L_{photo}^e = \sum_a q_{photo}^a n_d^a$ . В последнем уравнении  $v_e$ ,  $v_i$  – скорости зарядки, вызванные натеканием электронов и ионов на поверхность микрочастицы,  $q_{photo}$  – скорость ионизации, вы-

званная фотоэффектом. Коагуляцией пылевых частиц при их столкновениях друг с другом можно пренебречь: характерное время такого процесса  $\tau_{coag} \sim (n_d v \pi a^2)^{-1} \geq 10^6$  значительно превышает все остальные характерные времена.

Расчет микротоков положительных ионов и электронов окружающей плазмы на пылевые частицы проводился с помощью зондовой модели [30, 31]. В рамках этой модели скорости натекания ионов и электронов на заряженную пылевую частицу рассчитываются исходя из законов сохранения энергии и момента импульса. Если пылевые частицы заряжены отрицательно, то зондовое приближение приводит к следующим выражениям для скоростей зарядки:

$$v_e \approx \pi a^2 \left( \frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} n_e \exp\left( \frac{eq_d}{aT_e} \right),$$

$$v_i \approx \pi a^2 \left( \frac{8T_i}{\pi m_i} \right)^{1/2} n_i \left( 1 - \frac{eq_d}{aT_i} \right).$$

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

$$v_e \approx \pi a^2 \left( \frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} n_e \left( 1 + \frac{eq_d}{aT_e} \right),$$

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

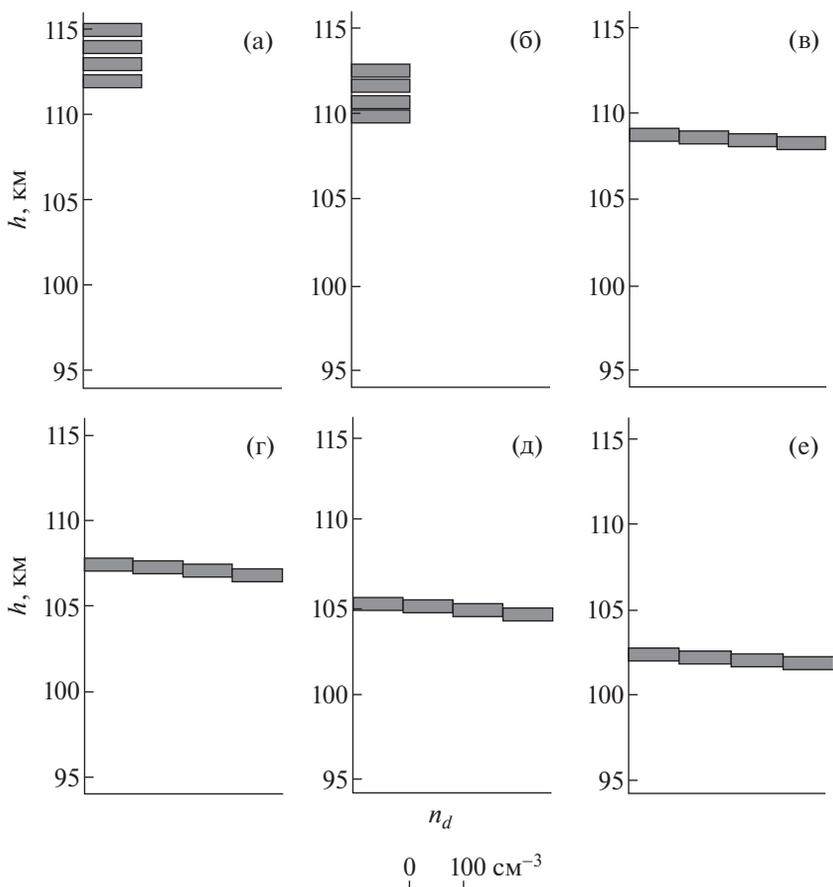
Здесь  $T_e$  и  $T_i$  – температуры электронов и ионов,  $m_\alpha$  – масса частицы вида  $\alpha$ . Ионизация пылевой частицы, обусловленная фотоэффектом, характеризуется скоростью  $q_{photo}$ , которая, в свою очередь, зависит от потока солнечного излучения  $F(\lambda)$ :

$$q_{photo} \approx \frac{\pi a^2 \beta}{hc} \int_0^{\lambda^*} \lambda F(\lambda) d\lambda,$$

где  $F(\lambda)$  – поток солнечного излучения,  $\lambda^*$  – максимальная длина волны фотона, приводящая к фотоэффекту (определяется минимальной энергией световых квантов),  $\beta$  – вероятность фотоэффекта. Типичные значения  $\beta$  обычно лежат в пределах  $10^{-2}$ – $10^{-4}$ , причем как правило  $\beta < 10^{-3}$  [5].

В настоящей работе было принято  $\beta = 5 \times 10^{-4}$ . Влияние фотоэффекта может быть важным для достаточно крупных частиц, для частиц наномасштабных размеров влияние фотоэффекта не столь существенно из-за малого сечения поглощения.

Минимальная энергия световых квантов  $2\pi\hbar c/\lambda$ , приводящая к фотоэффекту, определяется работой выхода  $W$  материала пылевой частицы



**Рис. 3.** Седиментация пылевого облака зародышей, первоначально составляющего модельный прямоугольный профиль концентраций на высотах 112–115 км. Начальный размер пылевых частиц облака равен 4.5 нм. Попадая в зону конденсации, пылевые частицы начинают увеличиваться в размерах за счет десублимации паров  $\text{CO}_2$ . С течением времени ( $t = 0$  (а), 40 (б), 120 (в), 200 (г), 240 (д), 280 с (е)) пылевые слои перемешиваются, формируя слоистую структуру пылевого облака.

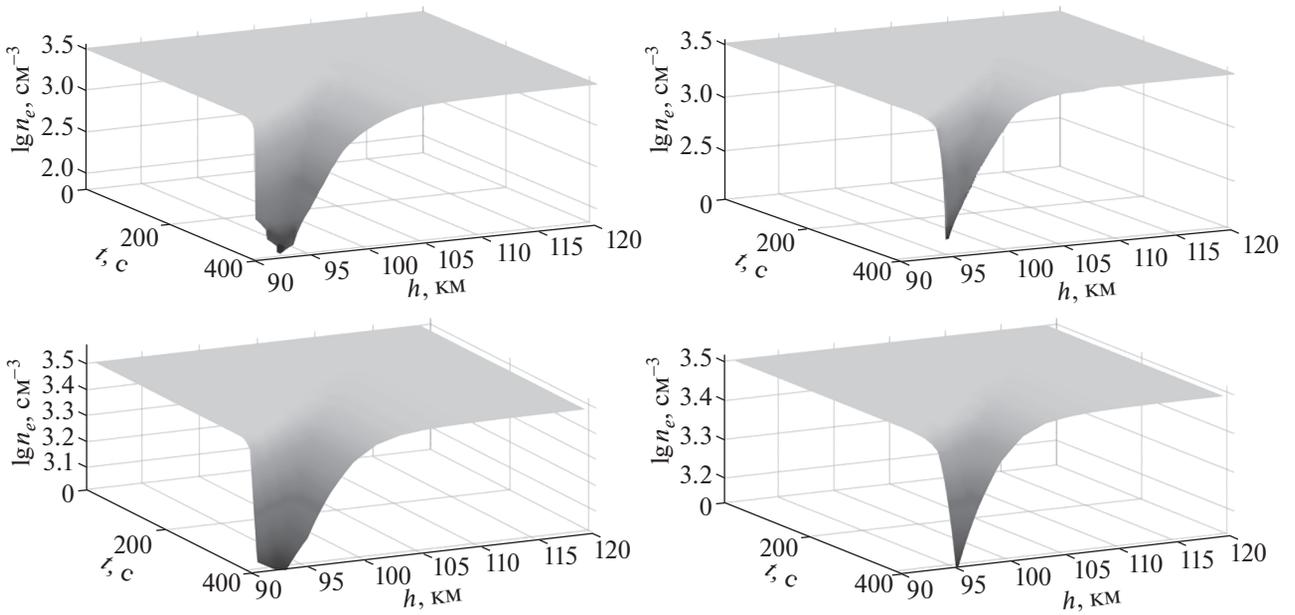
и ее зарядом:  $2\pi\hbar c/\lambda = W - (e^2 Z_d/a)$ . В данном случае можно не учитывать зависимость фототока электронов от величины заряда пылевой частицы, так как энергия фотона  $2\pi\hbar c/\lambda$  по порядку составляет несколько эВ, а порядок равновесного потенциала микрочастицы равен  $e^2|Z_d|/a \sim kT_e \simeq \simeq 0.01$  эВ  $\ll 2\pi\hbar c/\lambda$  эВ (см. [6]:  $T_e/e \approx T_n/e$ , где  $T_n \approx 0.03$  эВ – температура нейтрального газа ионосферы). Таким образом, можно считать, что максимальная длина волны фотона, приводящая к фотоэффекту, определяется только работой выхода материала пылевой частицы. В данной работе, как было отмечено выше, рассматривался случай наличия в составе пылевой частицы металлических примесей с работой выхода в 4 эВ.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

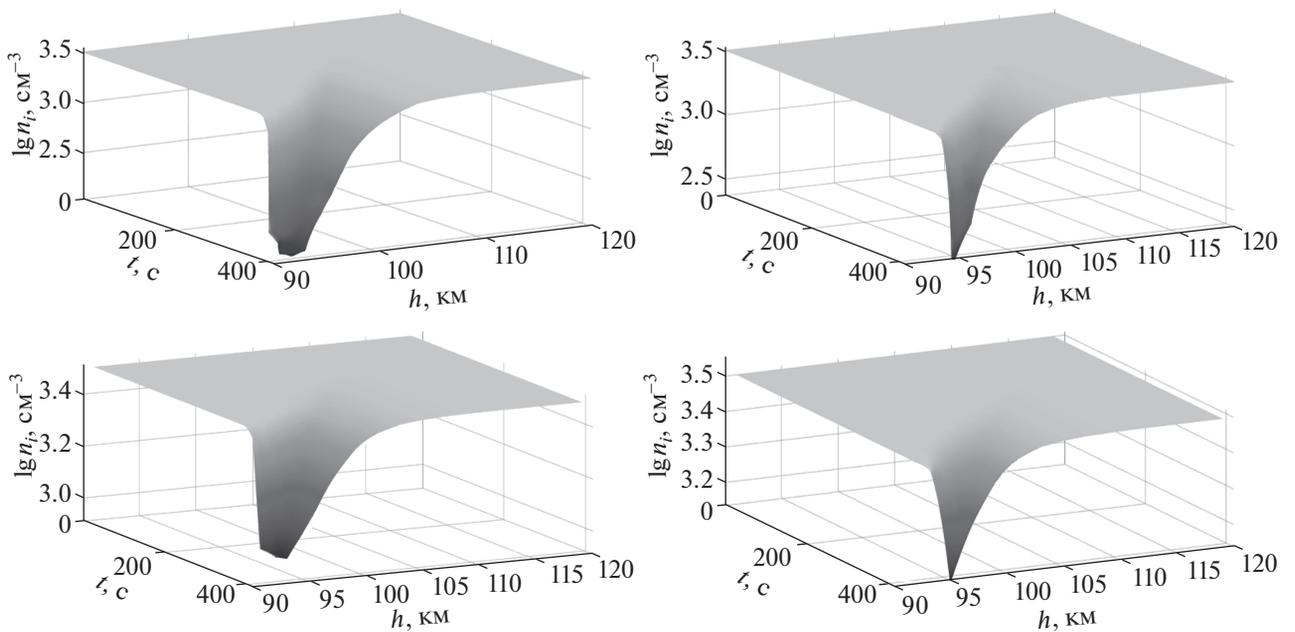
В настоящей работе в рамках изложенной выше модели на некоторых частных примерах была

рассмотрена эволюция слоев пылевых частиц в случае конденсации паров пересыщенного углекислого газа на Марсе. На рис. 3–7 представлены примеры подобного рассмотрения. Анализ результатов, полученных в ходе расчетов, позволяет сделать следующие выводы относительно возможного формирования и эволюции пылевых образований в марсианской ионосфере.

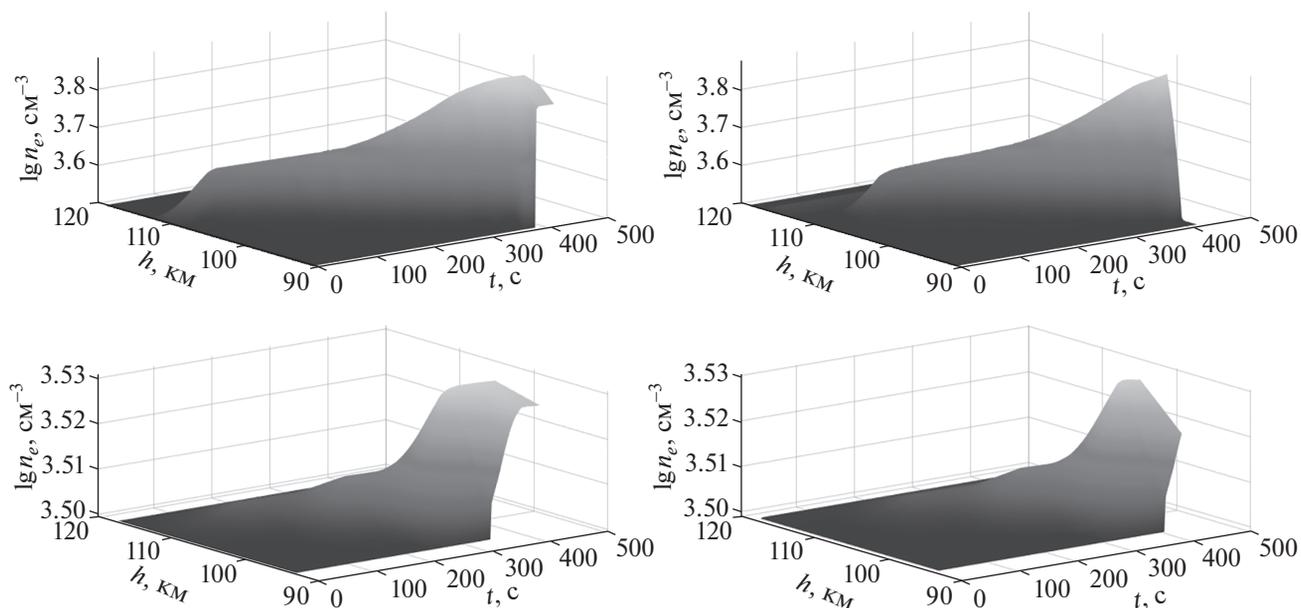
На рис. 3 представлена иллюстрация седиментации пылевого облака зародышей, первоначально составляющего модельный прямоугольный профиль концентраций на высотах 112–115 км. Начальный размер пылевых частиц облака равен 4.5 нм. Попадая в зону конденсации (зону сильного пересыщения углекислого газа), пылевые частицы начинают увеличиваться в размерах за счет десублимации паров  $\text{CO}_2$ . Поскольку начальное расположение слоев неодинаково, разные слои поглощают разное количество паров углекислого газа, что со временем приводит к перемешиванию слоев и образованию слоистой



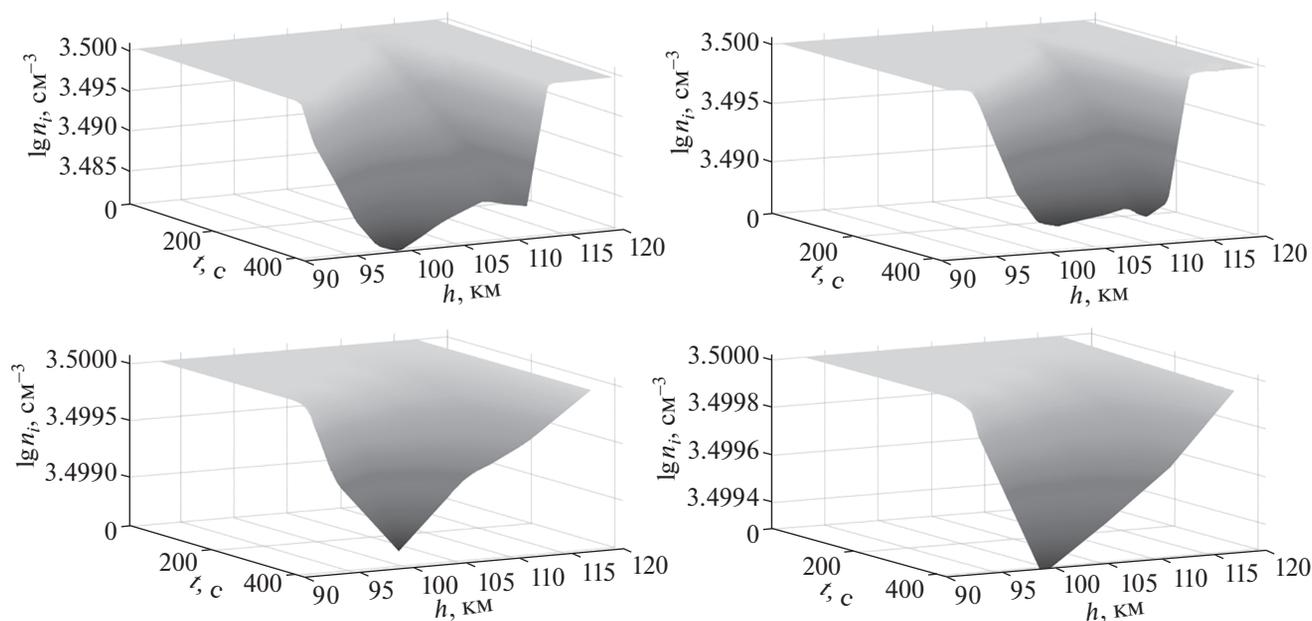
**Рис. 4.** Высотный профиль концентраций электронов в зависимости от времени для ночного случая (отсутствие фотоэффекта) при седиментации пылевого слоя. Верхняя панель соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ . Левая панель соответствует случаю, когда изначально пылевой слой был расположен на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км.



**Рис. 5.** Высотный профиль концентраций ионов в зависимости от времени для ночного случая (отсутствие фотоэффекта) при седиментации пылевого слоя. Верхняя панель соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ . Левая панель соответствует случаю, когда изначально пылевой слой был расположен на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км.



**Рис. 6.** Высотный профиль концентраций электронов в зависимости от времени для дневного случая (наличие фотоэффекта) при седиментации пылевого слоя. Верхняя панель соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ . Левая панель соответствует случаю, когда изначально пылевой слой был расположен на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км. Работа выхода принималась равной 4 эВ.



**Рис. 7.** Высотный профиль концентраций ионов в зависимости от времени для дневного случая (наличие фотоэффекта) при седиментации пылевого слоя. Верхняя панель соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ . Левая панель соответствует случаю, когда изначально пылевой слой был расположен на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км. Работа выхода принималась равной 4 эВ.

структуры пылевого облака. По наступлении определенного момента времени (для каждого слоя этот момент времени свой) все частицы достигают характерных размеров, по порядку равных 0.5–3 мкм. Характерное время седиментации пылевого облака, согласно расчетам, составляет около нескольких минут.

Пылевые частицы в ходе седиментации приобретают некоторый заряд, знак и абсолютная величина которого зависят от наличия или отсутствия фотоэффекта. При отсутствии фотоэффекта частица приобретает отрицательный заряд ( $q_d \sim -10e$ ), поскольку в этом случае заряд частицы определяется микротоками ионов и электронов окружающей плазмы, а электронный микроток превалирует над ионным, так как подвижность электронов выше подвижности ионов. Наличие фотоэффекта приводит к приобретению частицей с металлическими примесями заметного положительного заряда ( $q_d \sim 100e$ ).

Наличие у частицы заряда  $|Z_d| \sim 10-100$  приводит к возмущению заряженной компоненты ионосферы, поскольку суммарный заряд пылевых частиц становится сопоставимым с равновесными суммарными зарядами электронов и ионов. На рис. 4 и 5 представлены высотные профили концентраций электронов и ионов в зависимости от времени для ночного случая (отсутствие фотоэффекта). Верхняя панель на рисунках соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ . Левая панель соответствует случаю, когда изначально пылевой слой был расположен на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км. В случае отсутствия фотоэффекта, как уже было сказано выше, частица приобретает отрицательный заряд, а концентрации электронов и ионов понижаются. Это связано с тем, что наличие в атмосфере пылевых частиц приводит к дополнительному источнику рекомбинации электронов и ионов, за счет чего их концентрации уменьшаются.

На рис. 6 и 7 представлены высотные профили концентраций электронов и ионов в зависимости от времени для дневного случая (наличие фотоэффекта). Здесь также верхняя панель соответствует концентрации пылевых частиц  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , нижняя – концентрации  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ , левая панель соответствует случаю изначального расположения пылевого слоя на высоте в 112 км, правая – на высоте в 115 км. Наличие фотоэффекта приводит к появлению дополнительного источника электронов плазмы, фототока, в связи с чем наблюдается повышение электронной концентрации. В то же время модель прогнозирует понижение ионной концентрации за счет дополнительной рекомбинации на поверхности микрочастиц.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена самосогласованная модель пылевой плазмы в ионосфере Марса. Данная модель описывает седиментацию пылевых частиц, их рост за счет конденсации пересыщенных паров углекислого газа, а также процессы зарядки пылевых частиц, приводящие к изменениям состава электронно-ионной подсистемы атмосферы.

В рамках данной модели были рассмотрены эволюция слоев пылевых частиц и их влияние на заряженную компоненту ионосферы. Было показано, что в ходе седиментации пылевого облака зародышей, первоначально составляющего модельный прямоугольный профиль, пылевые частицы облака существенно увеличиваются в размерах за счет десублимации паров  $\text{CO}_2$ . Поглощая разное количество углекислого газа, пылевые слои с течением времени перемешиваются и образуют таким образом слоистую структуру пылевого облака. Характерный размер частиц в рамках такого облака по порядку равен 0.5–3 мкм. Время седиментации пылевого облака, согласно расчетам, составляет около нескольких минут. Кроме того, в ходе седиментации пылевые частицы приобретают некоторый заряд, знак и абсолютная величина которого зависят от наличия или отсутствия фотоэффекта. В случае отсутствия фотоэффекта заряд пылевых частиц определяется микротоками ионов и электронов и является отрицательным, при этом  $|Z_d| \sim 10e$ . В случае наличия фотоэффекта частица с металлическими примесями несет на себе заметный положительный заряд,  $|Z_d| \sim 100e$ .

Наличие у микрочастиц заряда  $|Z_d| \sim 10-100$  приводит к возмущению заряженной компоненты ионосферы, поскольку суммарный заряд пылевых частиц становится сопоставимым с равновесными суммарными зарядами электронов и ионов. В ночном случае, согласно результатам расчетов, происходит понижение концентраций электронов и ионов за счет дополнительной рекомбинации на поверхностях микрочастиц. В дневном случае ожидается повышение концентрации электронов за счет появления их дополнительного источника – фототока, для ионов же по-прежнему ожидается уменьшение концентрации вследствие рекомбинационных потерь на пылевых частицах.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shukla P.K., Mamun A.A.* Introduction to Dusty Plasmas Physics. Bristol/Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2002.

2. *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.
4. *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.
9. *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.
11. *Montmessin F., Bertaux J.L., Quémerais E., Korablev O., Rannou P., Forget F., Perriera S., Fussend D., Lebonnois S., Rébéraca A.* // Icarus. 2006. V. 183. P. 403.
12. *Montmessin F., Gondet B., Bibring J.P., Langevin Y., Drossart P., Forget F., Fouchet T.* // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. E11S90.
13. *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.
14. *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.
15. [https://www.newsru.com/hitech/30may2021/mars\\_clouds.html](https://www.newsru.com/hitech/30may2021/mars_clouds.html)
16. *Дубинский А.Ю., Попель С.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 22.
17. *Извекова Ю.Н., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 1010.
18. *Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 913.
19. *Reznichenko Yu.S., Dubinskii A.Yu., Popel S.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1556. P. 012072.
20. *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.
21. *Fox J.L., Benna M., Mahaffy P.R., Jakosky B.M.* // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8977.
22. *Алтунин В.В.* // Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Издательство стандартов, 1975. С. 546.
23. *Patela M.R., Zarneckia J.C., Catling D.C.* // Planet. Space Sci. 2002. V. 50. P. 915.
24. *Vicente-Retortillo Á., Valero F., Vázquez L., and Martínez G.M.* // J. Space Weather Space Clim. 2015. V. 5. Art. A33.
25. *Bertaux J.-L., Korablev O., Perrier S., Quémerais E., Montmessin F., Leblanc F., Lebonnois S., Rannou P., Lefèvre F., Forget F., Fedorova A., Dimarellis E., Reberac A., Fonteyn D., Chaufray J.Y., Guibert S.* // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. E10S90.
26. *Bertaux J.-L., Fonteyn D., Korablev O., Chassefière E., Dimarellis E., Dubois J.-P., Hauchecorne A., Lefèvre F., Cabane M., Rannou P., Lvasseur-Regourd A.-C., Cernogora G., Quémerais E., Hermans C., Kockarts G., Lipkens C., de Maziere M., Moreau D., Muller C., Neefs E., Simon P.-C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Moroz V.-I., Rodin A., Sandel B., Stern A.* // ESA Special Publication. 2004. V. 1240. P. 95.
27. *Delgado-Bonal A., Zorzano M.-P., Martín-Torres F.J.* // Solar Energy. 2016. V. 134. P. 228.
28. *González-Galindo F.* // Oxford Research Encyclopedia, Planetary Science. Oxford University Press, USA. 2020.
29. *Christou A., Vaubailion J., Withers P., Hueso R., Killen R.* // Earth and Planetary Astrophysics. Cambridge University Press. 2019. P. 119.
30. *Chen F.F.* // Plasma Diagnostic Techniques / Eds. R.H. Huddlestone, S.L. Leonard. New York: Academic, 1965. Ch. 4.
31. *Barnes M.S., Keller J.H., Forster J.C., O'Neill J.A., Coultas D.K.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 313.