

АСТРОФИЗИКА

УДК 537.86+550.34.01

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ШКАЛЫ ВЫСОТ
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПРИПОЛЯРНОЙ ТЕРМОСФЕРЕ
СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ МАРСА ПО ДАННЫМ РАДИОЗАТМЕННОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА НА MARS GLOBAL SURVEYOR**

© 2011 г. А.П. Киреев, А.М. Крымский

Научно-исследовательский институт физики
Южного федерального университета,
пр. Стачки, 194, г. Ростов-на-Дону, 344090,
sakh@ip.sfedu.ru

The Institute of Physics of Southern Federal University,
Stachki Ave, 194, Rostov-on-Don, 344089,
sakh@ip.sfedu.ru

На основании данных радиозатмленного эксперимента на борту космического аппарата (КА) Pioneer-Venus был сделан вывод о том, что в термосфере Венеры резко уменьшается шкала высот атмосферы и снижается ее плотность на фиксированной высоте при переходе от освещенной дневной стороны к ночной. Сходство состава атмосфер и отсутствие собственных магнитных полей на Венере и в северной полусфере Марса послужило основанием для рассуждений о сходстве ионосфер и термосфер. Примерное постоянство высоты главного пика отличает Венеру от ситуации на Марсе, где согласно наблюдениям высота главного максимума концентрации электронов монотонно возрастает по мере роста солнечного зенитного угла. В этой работе данные радиозатмленного эксперимента на борту КА Mars Global Surveyor используются для выяснения: а) уменьшается ли шкала высот атмосферы Марса при переходе с дневной стороны на ночную и насколько; б) что отвечает за различие в зависимости высоты главного максимума концентрации электронов в ионосфере Венеры и северного полушария Марса от величины солнечного зенитного угла?

Ключевые слова: пространственные изменения, шкала высот, углекислый газ, северное полушарие Марса, радиозатмленный эксперимент.

On the base of data of Pioneer-Venus radio-occultation experiment it was concluded that within the thermosphere of Venus near terminator both the atmosphere scale-height and the density at fixed altitude decrease from day to night. Since atmosphere composition at Venus and Mars is similar and planetary magnetic fields are rather weak or absent one can expect similarity of ionosphere and thermosphere of those planets. At Venus the altitude of the main peak density is practically independent on the solar zenith angle (SZA) while at Mars the altitude of the main peak density monotonously and significantly increases with SZA. In this paper the data of Mars Global Surveyor radio-occultation experiment are used to establish a) whether or not the scale-height of martian atmosphere decreases from day to night; and b) what determines the aforementioned difference in variations of the altitude of the main peak density with SZA at Venus and Mars.

Keywords: spatial variations, scale height, carbon dioxide, Northern Hemisphere of Mars, radio-occultation experiment.

Модель α -чепменовского слоя с зависящей от высоты шкалой высот нейтралов N_n обычно используется для определения характеристик нейтральной атмосферы [1] вблизи максимума ионизации, вызванного фотохимическими процессами. На основании данных радиозатмленного эксперимента на борту космического аппарата (КА) Pioneer-Venus был сделан вывод о том, что термосфера Венеры «схлопывается»: резко уменьшается шкала высот атмосферы и снижается ее плотность на фиксированной высоте при переходе от освещенной дневной стороны к ночной криосфере [2]. Сходство состава атмосфер и отсутствие собственных магнитных полей на Венере и в северной полусфере Марса послужило основанием для рассуждений о сходстве ионосфер и термосфер. Однако анализ данных о положении максимума ионизации в ионосфере Венеры и Марса привел авторов статей [3, 4] к следующему заключению. Примерное постоянство высоты главного пика на Венере (небольшое увеличение от 140 до 144 км) отличает Венеру от Марса, где, согласно наблюдениям высота главного максимума

концентрации электронов монотонно возрастает по мере роста солнечного зенитного угла.

В данной работе материалы радиозатмленного эксперимента на борту КА Mars Global Surveyor способствуют выяснению: а) уменьшается ли шкала высот атмосферы Марса при переходе с дневной стороны на ночную и насколько; б) что отвечает за различие в зависимости высоты главного максимума концентрации электронов в ионосфере Венеры и северного полушария Марса от величины солнечного зенитного угла?

Метод определения параметров главного максимума концентрации электронов в ионосфере Марса и характеристик нейтральной атмосферы в окрестности главного максимума

Для оценки характеристик атмосферы вместо обычного α -чепменовского слоя используется условие фотохимического равновесия для однокомпонентной атмосферы, состоящей из углекислого газа и находящейся под действием ионизирующего излучения в

диапазоне частот от ν_1 до ν_2 (образование электронов при фотоионизации уравнивается потерями при диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов), что приводит к следующему соотношению между концентрацией углекислого газа в атмосфере Марса N_{CO_2} и концентрацией электронов n :

$$N_{CO_2} \approx N_{CO_2}(h_{peak}) \frac{n^2}{n_{peak}^2} \frac{J_{CO_2}|_{h=h_{peak}}}{J_{CO_2}} \times \left[\frac{T_e(h_{peak})}{T_e} \right]^{0,63} \quad (1)$$

Нижний индекс CO_2 здесь и далее указывает на углекислый газ; n_{peak} – максимальная концентрация электронов; h_{peak} – высота максимума концентрации электронов; $J_{CO_2} \approx \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_{\infty}(\nu) \eta_{CO_2}(\nu) \sigma_{CO_2}(\nu) \exp[-\tau] d\nu$ – скорость фотоионизации углекислого газа (ν – частота фотона; $I_{\infty}(\nu)$ – спектр излучения Солнца на орбите Марса; $\eta(\nu)$ и $\sigma(\nu)$ – эффективность ионизации газа и сечение поглощения в случае фотона с частотой ν соответственно; $\tau(\nu, x, y, z)$ – оптическая толщина атмосферы для излучения с частотой ν ; $\partial\tau/\partial l \approx \sigma_{CO_2}(\nu) N_{CO_2}$; l – путь, пройденный фотоном вдоль луча распространения излучения); T_e – температура электронов.

Соотношение (1) является хорошим приближением условия баланса числа свободных электронов до тех пор, пока выполнены условия $N_O \ll N_{CO_2}$ (N_O – концентрация атомарного кислорода) и $|R|/k_{O_2^+} n^2 \ll 1$, где $R = -div(n\mathbf{V}_e) + N_O \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_{\infty}(\nu) \sigma_O(\nu) [\eta_{O^+}(\nu) - \eta_{CO_2^+}(\nu)] \exp[-\tau(\nu)] d\nu + k_{O_2^+} n n_{O^+} - (k_{CO_2^+} - k_{O_2^+}) n n_{CO_2^+} + Q_{impact}$; \mathbf{V}_e – потоковая скорость электронов; $k_{O_2^+}$ и $k_{CO_2^+}$ – скорость диссоциативной рекомбинации и $n_{O_2^+}$ и $n_{CO_2^+}$ концентрации ионов O_2^+ и CO_2^+ соответственно; n_{O^+} – концентрация ионов O^+ ; Q_{impact} – скорость образования электронов в результате ионизации электронным ударом.

Для оценки величины R необходимо использовать данные плазменных экспериментов (в частности, данные, относящиеся к ионному составу плазмы и электронным потокам) и/или численные модели ионосферы/атмосферы Марса, достаточно точно учитывающие влияние ионизации электронным ударом. Теоретический анализ влияния конвекции плазмы и фотохимических реакций на высотное распределение концентрации электронов показал, что диффузия плазмы вверх оказывается менее значительным фактором в области ниже 160–180 км в подсолнечной части ионосферы Марса [5]. По мере продвижения к терминатору высота границы между областями фото-

химического и диффузионного равновесия снижается, так что влиянием вертикальной диффузии можно пренебрегать только до высот 145–150 км [6].

Влияние ионизации нейтралов ударом вторичных фотоэлектронов, которые появляются после поглощения рентгеновских фотонов, становится существенным значительно ниже высоты максимума ионизации, поскольку оптическая толщина атмосферы убывает с ростом частоты фотона. Вторичный максимум концентрации/плечо может появляться в результате такого процесса [7]. Обычно вторичный максимум концентрации/плечо находится на высотах менее 115 км.

Модель α -чепменовского слоя эквивалентна соотношению (1) при выполнении следующих дополнительных условий:

а) излучение Солнца монохроматическое;

$$\text{б) } \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} = 1;$$

$$\text{в) } \left| 1 - \frac{H_n}{H_n(h_{peak})} \exp\left(-\int_{h_{peak}}^h \frac{dh}{H_n}\right) \right| \gg \left| \int_{h_{peak}}^h \exp\left(-\int_{h_{peak}}^h \frac{dh}{H_n}\right) \frac{d}{dh} \left(\frac{H_n}{H_n(h_{peak})} \right) dh \right|;$$

$$\frac{1}{H_n} = -\frac{\partial \ln(N_{CO_2})}{\partial h} \text{ – шкала высот концентрации}$$

углекислого газа.

Условие максимума концентрации электронов:

$$\frac{\partial}{\partial h} n = 0 \text{ ведет к соотношению:}$$

$$\frac{\partial l}{\partial h} \sigma_{CO_2}^*(h_{peak}) N_{CO_2}(h_{peak}) \approx - \left[\left(\frac{1}{H_n} + 0,63 \frac{\partial}{\partial h} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} - \frac{\partial \sigma_{CO_2}^*}{\sigma_{CO_2}^* \partial h} \right) \right]_{h=h_{peak}} \quad (2)$$

Здесь для учета немонахроматического характера излучения, каким и является излучение Солнца, использовано эффективное сечение поглощения излучения в частотном интервале от ν_1 до ν_2 – $\sigma_{CO_2}^*$. При таком подходе из-за зависимости оптической толщи от частоты излучения эффективное сечение поглощения излучения $\sigma_{CO_2}^*$, учитывающее изменение спектра излучения при поглощении, оказывается зависящим от высоты. Знание спектра излучения на орбите планеты $I_{\infty}(\nu)$ требуется только при расчете $\sigma_{CO_2}^*$ и

затем $\frac{\partial \sigma_{CO_2}^*}{\sigma_{CO_2}^* \partial h}$, входящего в правую часть соотношения (2).

$\frac{T_e(h_{peak})}{T_e}$ может быть определено с использованием либо эмпирической модели, основанной на данных электронных датчиков, либо теоретической модели.

Как видно, это соотношение позволяет определить эффективную шкалу высот в атмосфере на высоте, равной высоте максимума концентрации электронов в

ионосфере, минуя вычисления плотности нейтралов, если известно значение

$$A_{peak} = \frac{\partial}{\partial h} \sigma_{CO_2}^*(h_{peak}) N_{CO_2}(h_{peak}). \quad (3)$$

В рамках использованного подхода точность шкалы высот углекислого газа, полученной с использованием любого из имеющихся высотных профилей концентрации электронов, зависит от следующих факторов: а) величины отношения $|R|/k_{O_2} n^2$; б) отношения концентраций N_O/N_{CO_2} в месте, где происходило затмение КА; в) отклонения реального спектра излучения Солнца от модельного спектра (например, спектра излучения в модели SOLAR 2000); г) точности принятой модели $\frac{T_e(h_{peak})}{T_e}$.

Радиозатменный эксперимент дает данные о распределении электронов как выше главного максимума концентрации, так и ниже него. Используя параболическую аппроксимацию в окрестности максимума (ряд Тейлора) либо самой концентрации электронов $n(h)$ [8]:

$$n(h) \approx n_{peak} + \frac{n_{peak}(h-h_{peak})^2}{4} \frac{\partial}{\partial h} \times$$

$$\times \left[\frac{\partial J_{CO_2}}{J_{CO_2} \partial h} - \frac{1}{H_n} - 0,63 \frac{\partial}{\partial h} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} \right]_{h=h_{peak}} + O((h-h_{peak})^3), \quad (4)$$

либо $\ln n(h)$ (как в [8, 9]):

$$\ln n(h) \approx \ln n_{peak} + \frac{(h-h_{peak})^2}{4} \frac{\partial}{\partial h} \times \left[\frac{\partial J_{CO_2}}{J_{CO_2} \partial h} - \frac{1}{H_n} - 0,63 \frac{\partial}{\partial h} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} \right]_{h=h_{peak}} + O((h-h_{peak})^3), \quad (5)$$

можно определить n_{peak} , h_{peak} и

$$\Lambda_{peak} = \frac{\partial}{\partial h} \times \left[\frac{\partial J_{CO_2}}{J_{CO_2} \partial h} - \frac{1}{H_n} - 0,63 \frac{\partial}{\partial h} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} \right]_{h=h_{peak}} \quad (6)$$

для каждого из имеющихся высотных профилей концентрации электронов. Соотношения, связывающие параметры регрессии и параметры тейлоровского ряда n_{peak} , h_{peak} и Λ_{peak} , а также критерии наилучшей аппроксимации, которые использовались в [6, 7, 9], сопоставлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение между параметрами используемой параболической аппроксимации и n_{peak} , h_{peak} и Λ_{peak} и критерий наилучшей аппроксимации, использованные в [7–9]

Параметр	Источник	
	[8]	[7, 9]
Аппроксимируемый высотный профиль	$n(h)$	$\ln n(h)$
Регрессия	$y(h) = a + bh + ch^2$	$y(h) = a + bh + ch^2$
Параметр регрессии: a	$a = n_{peak} + \frac{n_{peak}}{4} \Lambda_{peak} (h_{peak})^2$	$a = \ln n_{peak} + \frac{1}{4} \Lambda_{peak} (h_{peak})^2$
b	$b = -\frac{n_{peak} h_{peak}}{2} \Lambda_{peak}$	$b = -\frac{h_{peak}}{2} \Lambda_{peak}$
c	$c = \frac{n_{peak}}{4} \Lambda_{peak}$	$c = \frac{1}{4} \Lambda_{peak}$
Критерий наилучшей аппроксимации	$\min \left\{ \sum_{i=1}^N [n(h_i) - y(h_i)]^2 \right\}$	$\min \left\{ \sum_{i=1}^N [\ln n(h_i) - y(h_i)]^2 \right\}$

Даже при том, что интервал, на котором проводится аппроксимация, набор значений концентрации $n(h_i)$ и другие используемые параметры совпадают, из-за различия в критерии наилучшего приближения в случае аппроксимации $n(h_i)$ и $\ln n(h_i)$ получаемые значения n_{peak} , h_{peak} и Λ_{peak} могут различаться довольно существенно. Поскольку в радиозатменном эксперименте погрешность, связанная с шумами, определяется для n , а не для $\ln(n)$, то только аппроксимация высотного распределения n обеспечивает симметричное гауссово распределение невязок аппроксимации и поэтому является предпочтительной.

Независимо от способа определения значения Λ_{peak} справедливо следующее соотношение:

$$A_{peak}^2 - D + \Lambda_{peak} = 0. \quad (7)$$

Здесь

$$D = \left(A_{peak} \cdot 0,63 \frac{\partial}{\partial h} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} - \frac{\partial}{\partial h} \frac{1}{H_n} - 0,63 \frac{\partial^2}{\partial h^2} \ln \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} \right)_{h=h_{peak}}. \quad (8)$$

Соотношение (7) позволяет определить значение A_{peak} , используя метод последовательных приближе-

ний. На первом шаге используются следующие предположения:

а) излучение Солнца считается монохроматическим;

$$б) \frac{T_e(h_{peak})}{T_e} = 1;$$

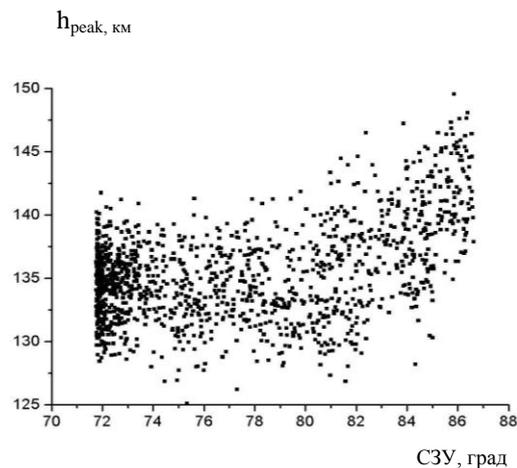
$$в) D \approx \left(-\frac{\partial}{\partial h} \frac{1}{H_n} \right) \Big|_{h=h_{peak}} = 0.$$

Так что в результате оказывается, что $A_{peak}^2 = -\Lambda_{peak}$ и $A_{peak} \approx -\frac{1}{H_n} \Big|_{h=h_{peak}}$.

Дальнейший статистический анализ не учитывает значений долготы, что соответствует эффективному усреднению по долготе. В дальнейшем скобки $\langle \dots \rangle$ указывают на такое усреднение. Наилучшая линейная аппроксимация высоты максима концентрации $\langle h_{peak}(\chi) \rangle = E + F * \chi$, которая представляет собой ряд Тейлора с двумя членами, позволяет определить приближенное значение $\frac{d \langle h_{peak} \rangle}{d \chi}$ во всем анализируемом интервале СЗУ. Аналогичная наилучшая линейная аппроксимация $\langle H_n(\langle h_{peak}(\chi) \rangle, \chi) \rangle = A + B * \chi$ на всем анализируемом интервале СЗУ позволяет определить приближенное значение $\langle \frac{d H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi)}{d \chi} \rangle$.

Поскольку

$$\frac{d \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{d \chi} = \frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \chi} + \frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \langle h_{peak} \rangle} \frac{d \langle h_{peak} \rangle}{d \chi}, \quad (9)$$



то величина $\frac{d \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{d \chi}$ определяется как зависимость $\langle H_n \rangle$ от СЗУ на фиксированной высоте $\frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \chi}$, так и комбинацией высотной зависимости $\langle H_n \rangle$ и зависимости $\langle h_{peak} \rangle$ от СЗУ.

Используя наилучшую линейную аппроксимацию $\langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle = C + K * \langle h_{peak} \rangle$ на отдельных малых интервалах СЗУ (в нашем случае ширина интервала была принята равной 1°) и затем усредняя полученные значения коэффициента K, можно определить приближенное значение $\frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \langle h_{peak} \rangle}$ в анализируемом малом интервале СЗУ и высот $\langle h_{peak} \rangle$.

На заключительной стадии анализа с помощью соотношения

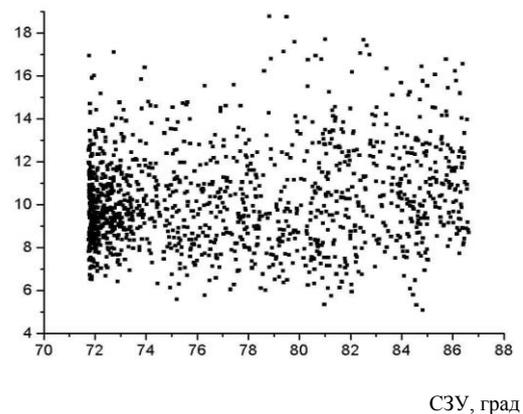
$$\frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \chi} \approx \frac{d \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{d \chi} - \frac{\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle}{\partial \langle h_{peak} \rangle} \frac{d \langle h_{peak} \rangle}{d \chi} \quad (10)$$

можно оценить характер зависимости $\langle H_n \rangle$ от СЗУ на фиксированной высоте; для выяснения, «схлопывается» ли термосфера Марса и с какой скоростью?

Высотный и СЗУ/широтный градиенты шкалы высот нейтральной атмосферы вблизи терминатора

Как функции СЗУ, $\langle h_{peak} \rangle$ и $\langle H_n(\langle h_{peak} \rangle) \rangle$ показаны на рисунке (панели слева и справа соответственно).

Шкала. высот. км



Зависимость $\langle h_{peak} \rangle$ и $\langle H_n(\langle h_{peak} \rangle) \rangle$ от СЗУ (панели слева и справа соответственно)

Пока $\chi < 82^\circ$, $\langle h_{peak} \rangle$ изменяется незначительно. Но в интервале $82^\circ \leq \chi \leq 87^\circ$ наилучшая аппроксимация $\langle h_{peak} \rangle$ линейной функцией СЗУ дает эффективное значение градиента $d \langle h_{peak} \rangle / d \chi \approx 1,47 \pm 0,16$ км/град. В то же самое время $\langle H_n(\langle h_{peak} \rangle) \rangle$ практически не изменяется во всем анализируемом интервале

$72^\circ < \chi < 87^\circ$, так что эффективное значение градиента $d \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle) \rangle / d \chi \approx 0,06 \pm 0,01$ км/град.

Для расчета $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \langle h_{peak} \rangle$ и $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \chi$ были использованы данные, полученные при местном времени на Марсе, меньшем, чем 3 ч, поскольку в этом случае изменения

$\langle H_n(\langle h_{peak} \rangle) \rangle$ должны быть в основном связаны с изменением СЗУ. Затем для выделения эффекта существенного возрастания высоты максимума ионизации h_{peak} при больших СЗУ, $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \langle h_{peak} \rangle$ был вычислен для $\chi < 82^\circ$ и $82^\circ \leq \chi \leq 87^\circ$. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

$\langle \partial H_n(h_{peak}, \chi, \psi) / \partial h_{peak} \rangle$ для двух «протяженных» интервалов СЗУ

Интервал СЗУ	$\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \langle h_{peak} \rangle$
$\chi < 82^\circ$	$0,41 \pm 0,03$
$82^\circ \leq \chi \leq 87^\circ$	$0,32 \pm 0,03$

Из соотношения (10) затем следует, что $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \chi$ незначителен, если $\chi < 82^\circ$ и $\langle \partial H_n(h_{peak}, \chi, \psi) / \partial \chi \rangle \approx -0,5 \div -0,4$ км/град, когда $82^\circ \leq \chi < 87^\circ$.

Приведенные оценки градиента $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \langle h_{peak} \rangle$ указывают на то, что $\langle H_n \rangle$ существенно увеличивается с ростом высоты. Если же высота не изменяется, то оказывается, что $\langle H_n \rangle$ уменьшается по мере приближения к терминатору: $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \chi < 0$, если СЗУ больше 82° .

Выводы

Анализ данных радиозатменного эксперимента на КА MGS подтверждает тот факт, что в северном полушарии Марса, в котором палеомагнитные поля относительно слабы, в интервале широт $60^\circ - 70^\circ$ высота главного максимума концентрации электронов в ионосфере начинает быстро возрастать со скоростью примерно 1,5 км/град по мере увеличения СЗУ. Это отличает ионосферу/термосферу северного полушария Марса от ионосферы/термосферы Венеры. Кроме того, достаточно велик высотный градиент шкалы высот углекислого газа: $\partial \langle H_n(\langle h_{peak} \rangle, \chi) \rangle / \partial \langle h_{peak} \rangle \approx 0,4$, что свидетельствует об интенсивном нагреве атмосферы

Марса сверху. В то же время в северном полушарии Марса, как и на Венере, происходит «схлопывание» термосферы при переходе с освещенной дневной стороны на ночную.

Таким образом, разреженная ионосфера северного полушария Марса в отсутствие существенных палеомагнитных полей не экранирует термосферу от притока в нее сверху энергии, переносимой потоком солнечного ветра, и приносимая солнечным ветром энергия существенно влияет на энергобаланс в термосфере. Вблизи терминатора ионосфера эффективнее экранирует атмосферу из-за падения динамического давления потока солнечного ветра, поступление энергии сверху в термосферу падает и начинает проявляться «схлопывание» термосферы на холодной ночной стороне Марса.

Литература

1. *Rishbeth H., Garriott O.K.* Introduction to Ionospheric Physics. N.Y., 1969. 331 p.
2. The ionospheric peak on the Venus dayside / *T.E. Cravens* [et al.] // J. of Geophys. Research. 1981. Vol. 86. P. 11323–11329.
3. *Fox J.L.* The production and escape of nitrogen atoms on Mars // J. Geophys. 1993. Vol. 98. P. 3297–3310.
4. *Fox J.L., Yeager K.E.* Morphology of the Near-Terminator Martian Ionosphere: A Comparison of Models and Data // J. Geophys. 2006. Vol. 111, № A10. P. 309.
5. *Bauer J.S., Hantsch M.H.* Solar Cycle Variation of the Upper Thermosphere of Mars // Geophys. 1989. Vol. 16. P. 373–376.
6. The effect of Crustal Magnetic Fields on the Near Terminator Ionosphere at Mars: Comparison of in Situ Magnetic Field Measurements with the Data of Radio Science Experiments Onboard Mars Global Surveyor / *A.M. Krymskii* [et al.] // J. Geophys. 2003. Vol. 108.
7. Ionospheric Characteristics Above Martian Crustal Magnetic Anomalies / *P. Withers* [et al.] // J. Geophys. 2005. Vol. 32. L16204.
8. The Effect of the Solar Radiation in the Topside Atmosphere/ Ionosphere of Mars: Mars Global Surveyor Observations / *T. K. Breus* [et al.] // J. Geophys. 2004. Vol. 109.
9. *Withers P., Mendillo M.* Response of Peak Electron Density in the Martian Ionosphere to Day-To-Day Changes in Solar Flux Due to Solar Rotation PI // Space Sci. 2005. Vol. 53. P. 1401.