

## О влиянии излучения Солнца и солнечного ветра на верхнюю атмосферу/ионосферу Марса

Барашян К.К. ([kbaras@rambler.ru](mailto:kbaras@rambler.ru)) (1), Бреус Т.К. (2), Крымский А.М. (1)

(1) Ростовский государственный университет, (2) Институт космических исследований РАН

### 1. Введение

Шкала высот нейтральной атмосферы Марса  $H_n = -\frac{dh}{d \ln N}$  ( $h$  – высота,  $N$  – плотность нейтральной атмосферы) пропорциональна температуре атмосферы  $T_n$  и, следовательно, может зависеть от солнечной активности. Как известно, существуют длиннопериодические (период больше 24 часов) и короткопериодические (период значительно меньше 24 часов) вариации потока солнечного излучения. Как длиннопериодические, так и короткопериодические вариации влияют на атмосферу/ионосферу планеты.

Поток крайнего ультрафиолетового (*EUV*) излучения Солнца вблизи Марса не измерялся во время экспериментов по радиозатмению космических аппаратов (КА) *Маринер-9*, *Викинг-1*, *Викинг-2* и *Марс Глобал Сервейер*. Поэтому для анализа требуется адекватное приближение потока. В случае длиннопериодических вариаций, в качестве приближения *EUV* потока используются ежедневные усредненные значения индекса  $F_{10.7}$  (или индекса  $E_{10.7}$ ), получаемые из мониторинга потока солнечного излучения вблизи Земли, осуществляемого целой группой КА. Данные в процессе анализа пересчитываются с учетом взаимного расположения Марса и Земли. Как показывают измерения, проводимые на борту КА *GOES-8* и *GOES-10*, часто имеют место вспышки излучения с длиной волны 1–8 Å, продолжительность которых значительно меньше 24 часов. Во время таких вспышек поток излучения на длине волны 1–8 Å возрастает иногда на порядок по величине. *EUV* излучение может показывать подобные короткопериодические вариации. К сожалению, адекватных способов реалистического приближения короткопериодических вариаций солнечного излучения к настоящему времени не имеется.

Данные экспериментов по радиозатмению нескольких КА серий *Маринер* и *Марс*, а также *Викинг-1* и *Викинг-2* проанализированы в работе [1]. Для нахождения зависимости между шкалой высот нейтральной атмосферы  $H_n$  и индексом  $F_{10.7}$  использовалась аппроксимация части высотного профиля электронной концентрации в окрестности

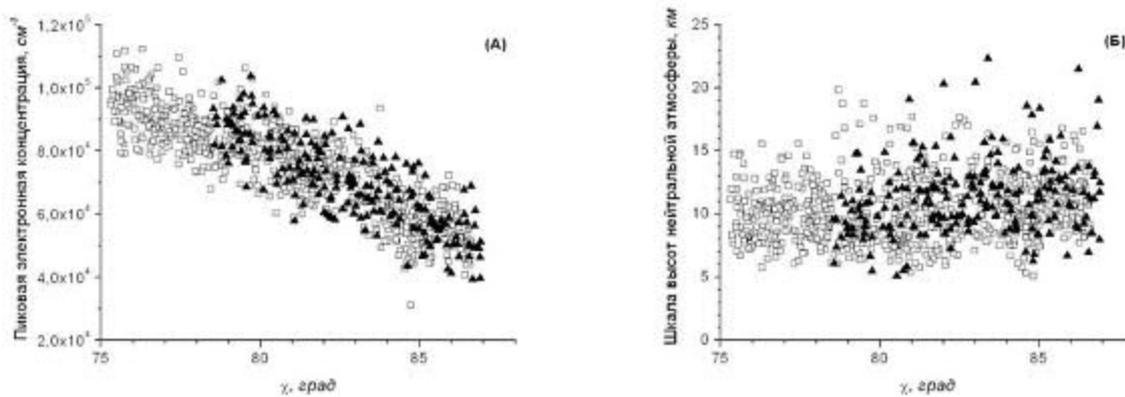
главного максимума слоем Чепмена. Показано, что в случаях наиболее точной аппроксимации отношение  $\frac{d \ln H_n}{d \ln F_{10.7}} = 0.16$ . В работе [2] эти данные были пересчитаны и сравнены с моделью термосферы *Изакова и Ростэ* [3].

Анализ условий в верхней атмосфере Марса, проведенный сравнительно недавно на основе данных КА *Марс Глобал Сервейор*, выявил присутствие в марсианской атмосфере немигрирующих приливных волн [4–8]. В профилях электронной концентрации эти немигрирующие волны проявляют себя, главным образом, в виде долготных вариаций высоты пика электронной концентрации. Крымский А.М. с соавторами [9] обнаружили, что существуют долготные вариации шкалы высот нейтральной атмосферы  $H_n$ , связанные с корковыми магнитными полями.

Координаты точек касания радиолуча к планете во время экспериментов по радиозатмению КА *Маринер-9*, *Викинг-1* и *Викинг-2* расположены в интервале широт от 40° ю.ш. до 38° с.ш. и до некоторой степени неоднородно распределены по долготе. Со статистической точки зрения этих данных недостаточно для исключения, например, сильного топографического эффекта. Остаточный вклад от различных эффектов может служить неустранимой помехой для выявления эффекта, связанного с солнечным излучением (см. [2]). В этой работе анализируются 732 профиля электронной концентрации, полученных в северном полушарии, и 219 профилей, полученных в южном полушарии. Профили получены из данных экспериментов по радиозатмению КА *Марс Глобал Сервейор*, координаты которых расположены в двух узких широтных интервалах: от 63° с.ш. до 77° с.ш. и от 69° ю.ш. до 64.5° ю.ш. Как показывают результаты моделирования, проведенного в работе [9], длиннопериодические вариации потока солнечного излучения регулируют, главным образом, среднее значение пиковой электронной концентрации в конкретных сессиях измерений. Минимизировав эффекты топографического характера и вклады от магнитных полей коркового происхождения, мы усреднили откорректированные характеристики распределения электронной концентрации, полученные через каждые 24 часа.

2. *Зависимость между средними значениями пиковой электронной концентрации  $n_{peak}$  и шкалы высот нейтральной атмосферы  $H_n$  и индексом солнечной активности  $E_{10.7}$*

На рис. 1 показаны пиковая электронная концентрация  $n_{peak}$  (а) и шкала высот нейтральной атмосферы  $H_n$  (б) как функции солнечно-зенитного угла (СЗУ)  $\chi$ , вычисленные для 732 профилей электронной концентрации в северном полушарии и 219 профилей в южном полушарии. Пиковая электронная концентрация значительно варьируется с изменением СЗУ  $\chi$  и наилучшей аппроксимирующей функцией для  $n_{peak}$  является  $n_{peak} \propto \sqrt{\cos \chi}$ . Поэтому, в дальнейшем, когда анализируются эффекты, связанные с солнечным излучением, мы будем оперировать с откорректированной пиковой концентрацией  $n_{peak} / \sqrt{\cos \chi}$ . В свою очередь, шкала высот нейтральной атмосферы  $H_n$ , в среднем, очень слабо зависит от СЗУ  $\chi$  (в случае наилучшей линейной аппроксимации имеем  $dH_n/d\chi = (0.12 \pm 0.03)$  км/град) и никакой коррекции не требуется.



**Рис.1.** Пиковая электронная концентрация  $n_{peak}$  (а) и шкала высот нейтральной атмосферы  $H_n$  (б) как функции солнечно-зенитного угла  $\chi$ , вычисленные для 732 профилей электронной концентрации в северном полушарии (пустые квадраты) и 219 профилей в южном полушарии (заполненные треугольники).

Откорректированная пиковая электронная концентрация в ионосфере Марса приближенно равна (см. [9]):

$$\frac{n_{peak}}{\sqrt{\cos \chi}} \approx \sqrt{\frac{I_{\infty} \eta \tau_{peak} \exp(-\tau_{peak})}{H_n k_1}}, \quad (1)$$

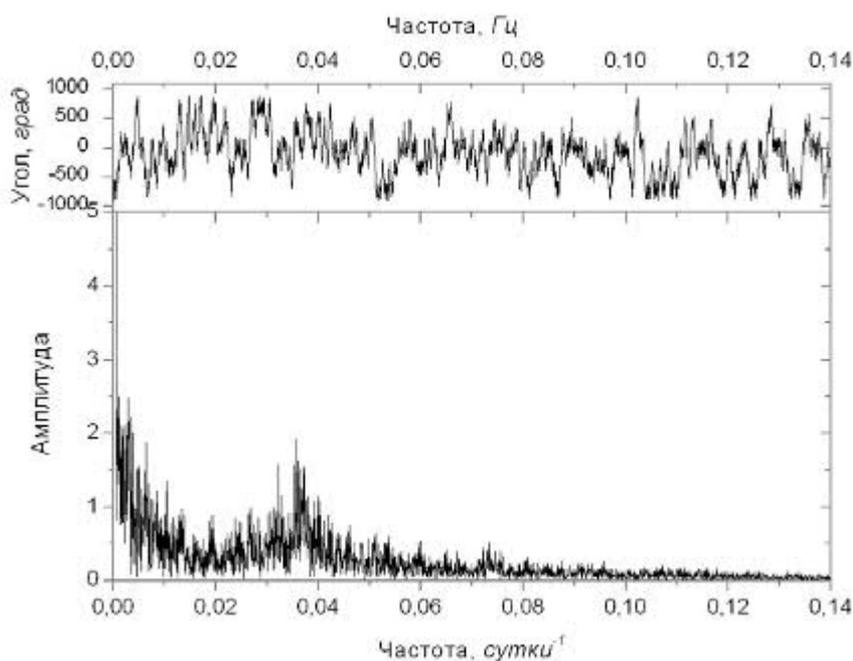
где  $I_{\infty}$  – поток крайнего ультрафиолетового излучения на орбите Марса,  $\eta$  – эффективность ионизации,  $\tau_{peak}$  – оптическая глубина пика,  $H_n$  – шкала высот

нейтральной атмосферы,  $k_1 = 8 \cdot 10^{-8} (10^3/T_e)^{0.63} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  – скорость диссоциативной рекомбинации (см. [10]),  $T_e$  – электронная температура в °К.  $\tau_{peak} \approx 1$ , и как следует из уравнения (1), среднесуточное значение выражения  $n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi}$  удовлетворяет соотношению:

$$\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle \propto \langle (I_\infty)^{0.5} (T_e)^{0.3} \rangle. \quad (2)$$

Скобки  $\langle \dots \rangle$  означают ежесуточное усреднение.

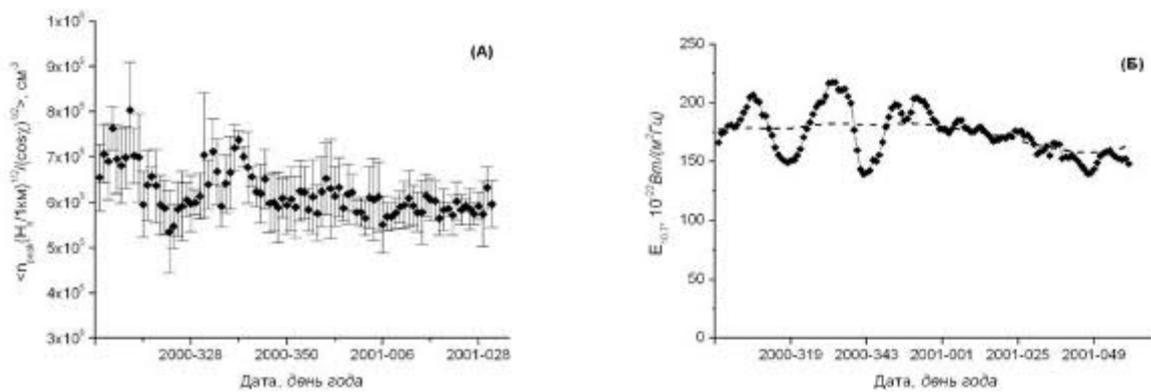
Если вариации электронной температуры  $T_e$  пренебрежимо малы, то  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  и  $\langle \sqrt{I_\infty} \rangle$  являются линейно коррелированными. Мы проверили эту гипотезу, используя 732 профиля электронной концентрации, полученные в период с 1 ноября 2000 г. (306-ой день года в файле с данными) по 31 января 2001 г. (31-й день года). Предполагается, что индекс  $E_{10.7}$  может заменить средний поток  $\langle I_\infty \rangle$ :  $\langle I_\infty \rangle \propto E_{10.7}$ .



**Рис. 2.** Спектр индекса  $E_{10.7}$ , рассчитанный для последних пяти циклов солнечной активности.

Спектр индекса  $E_{10.7}$ , рассчитанный для последних пяти циклов солнечной активности, представлен на рис. 2. В спектре, как это видно из рисунка, имеется пик, выступающий на частоте 0.035 1/сутки. Соответствующий период (приблизительно, 28 дней) очень близок к периоду кэррингтоновского вращения. При таких обстоятельствах,

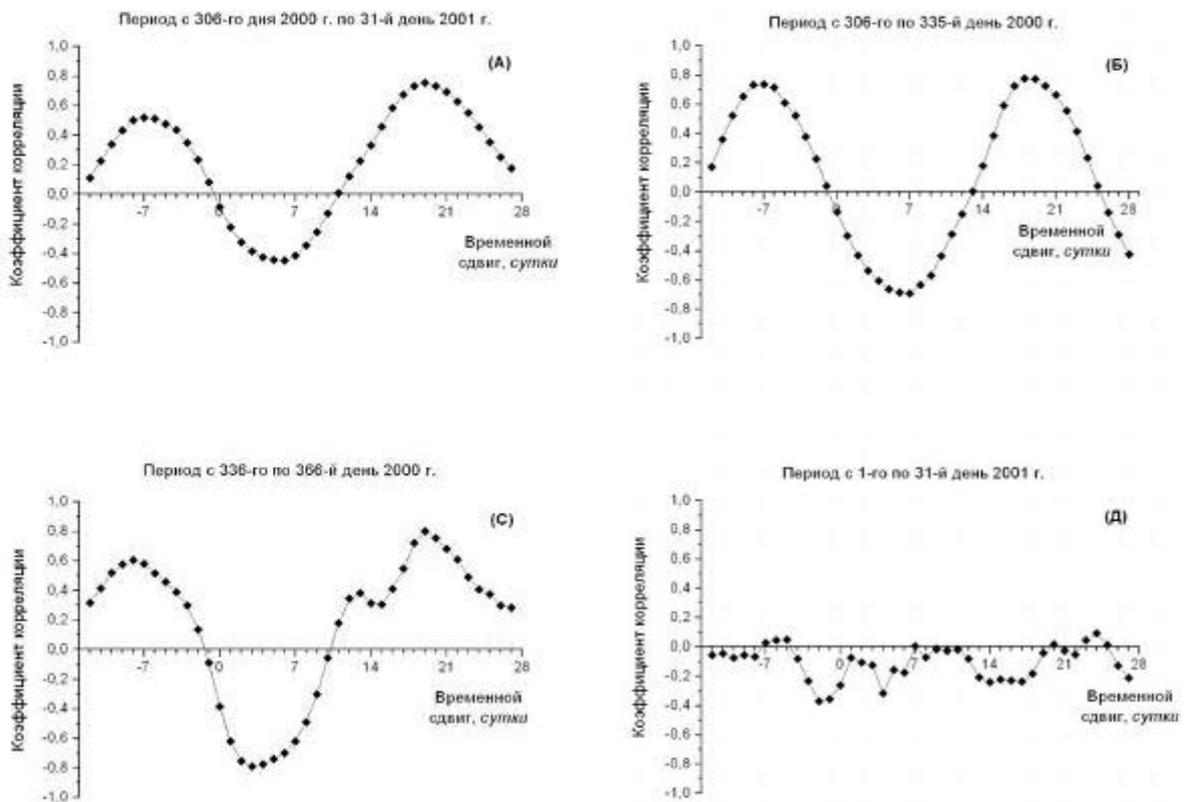
излучение от некоторой области Солнца будет незначительно изменяться в течение периода кэррингтоновского вращения. Марс и Земля расположены на разных солнечных долготах. Из-за кэррингтоновского вращения, излучение, испускаемое из некоторой заданной области на поверхности Солнца, доходит до Марса либо на несколько дней раньше, либо на несколько дней позже, чем до Земли. Как известно, Земля вращается вокруг Солнца с периодом в два раза меньшим, чем у Марса, и угол Марс-Солнце-Земля меняется примерно на  $15^\circ$  каждый месяц, так, что разность в фазе кэррингтоновского вращения изменяется не более чем на один день каждый месяц.



**Рис. 3.** Ежесуточные средние значения параметра  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  (а, данные северного полушария Марса) и вариации индекса  $E_{10.7}$  (б) в период с ноября 2000 г. по февраль 2001 г. На левом рисунке показано стандартное отклонение от среднего значения.

Мы вычислили взаимную корреляционную функцию: коэффициент корреляции величин  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  и  $(E_{10.7})^{1/2}$  как функцию временного сдвига между наборами данных  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  и  $(E_{10.7})^{1/2}$ . В работе использованы данные по индексу  $E_{10.7}$ , полученные в период с 295-го дня 2000 г. по 46-ой день 2001 г. Временной сдвиг варьируется от  $-12$  до  $+28$  суток. Закономерное изменение интенсивности солнечного излучения, вызванное орбитальным движением Марса, незначительно влияет на величину коэффициента корреляции в этом частном случае. Использованные данные и вычисленные корреляционные функции показаны на рис. 3 и 4. Первоначально, мы вычислили корреляционную функцию для полного трехмесячного периода измерений (с 1 ноября 2000 г. по 31 января 2001 г.) (рис. 4а), а затем для каждого из трех месяцев измерений в отдельности (рис. 4б, с 1 по 30 ноября 2000 г.; рис. 4с, с 1 по 31 декабря 2000 г.; рис. 4д, с 1

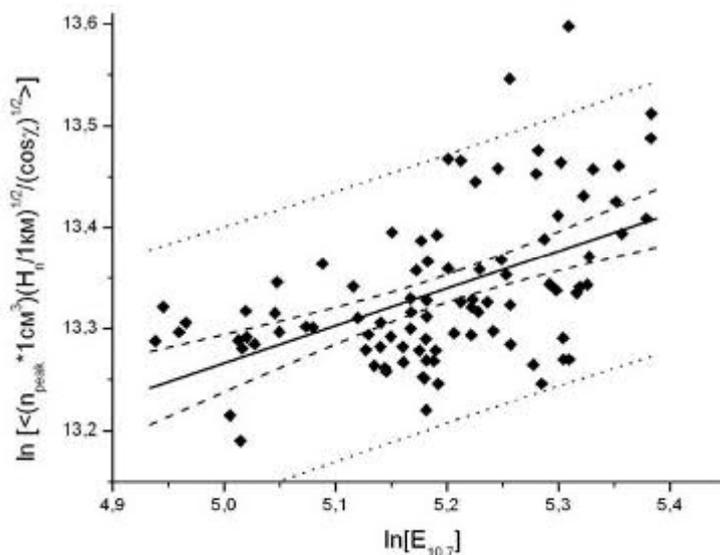
по 31 января 2001 г.). Сравнение панелей (б) и (с) (рис. 4) показывает, что для двух следующих друг за другом месяцев главный максимум корреляционной функции сдвигается приблизительно на день. Это отражает изменения в фазе кэррингтоновского вращения, которые пропорциональны углу Марс-Солнце-Земля. На рис. 5 показана зависимость  $\ln\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  от  $\ln(E_{10.7})$ . Наилучшей линейной аппроксимацией для данного массива точек является  $y = A + Bx$ , где  $A = 11.4 \pm 0.3$ ,  $B = 0.37 \pm 0.06$  и, следовательно,  $d \ln\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle / d \ln(E_{10.7}) \approx 0.37 \pm 0.06$ .



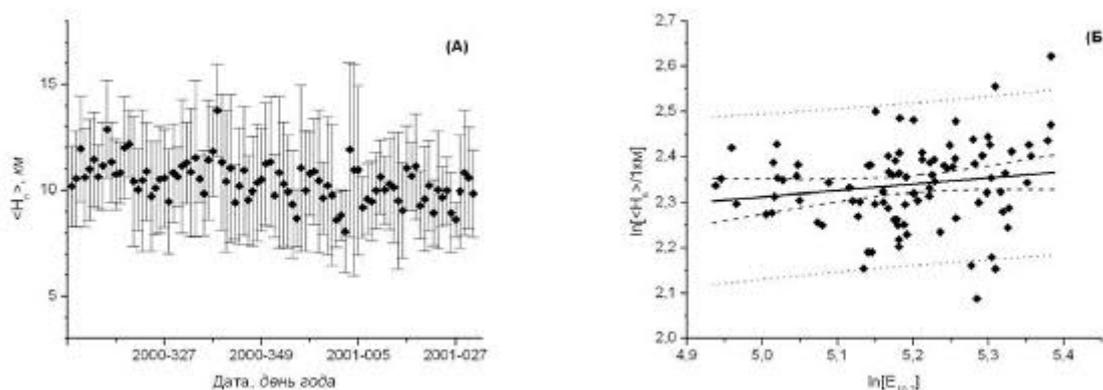
**Рис. 4.** Взаимные корреляционные функции двух наборов данных: параметра атмосферы/ионосферы планеты  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  и  $(E_{10.7})^{1/2}$ . Вычисления проведены для полного трехмесячного периода измерений (а) и для каждого из трех последовательных месяцев измерений в отдельности (б, с, д).

И, наконец, мы проанализировали зависимость  $\langle H_n \rangle$  от индекса  $E_{10.7}$ . На рис. 6а показаны временные изменения  $\langle H_n \rangle$  для периода с 306-го дня 2000 г. по 31-ый день 2001 г. На рис. 6б показан логарифм среднего значения  $\ln\langle H_n \rangle$  в зависимости от логарифма

индекса  $\ln(E_{10.7})$ . Наилучшей линейной аппроксимацией в этом случае является  $y = A + Bx$ , где  $A = 1.63 \pm 0.45$ ,  $B = 0.14 \pm 0.09$  и, поэтому,  $d \ln \langle H_n \rangle / d \ln(E_{10.7}) \approx 0.14 \pm 0.09$ .



**Рис. 5.**  $\ln \langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  как функция  $\ln(E_{10.7})$ . Сплошной линией показана наилучшая линейная аппроксимация, пунктирной – 95%-й доверительный уровень, точечной – 95%-й уровень предсказуемости.



**Рис. 6.** Ежесуточные изменения шкалы высот нейтральной атмосферы Марса  $\langle H_n \rangle$  для периода с 1 ноября 2000 г. по 31 января 2001 г. (а) и зависимость  $\langle H_n \rangle$  от индекса  $E_{10.7}$  (б).

### 3. Обсуждение.

При взаимодействии солнечного ветра с сильными и неоднородными магнитными полями коркового происхождения на Марсе могут формироваться мини-магнитосферы

[10–12]. В северном полушарии палеомагнитные поля являются достаточно слабыми и, как следствие, существуют только изолированные мини-магнитосферы. В южном полушарии ситуация совсем иная. Сильные палеомагнитные поля приводят к формированию там крупномасштабных мини-магнитосфер. На широтном диапазоне, исследованном в радиозатменном эксперименте КА *Марс Глобал Сервейор*, имеются огромные магнитосферные каспы. В области каспов атмосфера не защищена от прямого воздействия солнечного ветра и «горячие» электроны не захватываются магнитным полем.

В работе [9] сравниваются значения приведенной пиковой электронной концентрации в северном и южном полушариях Марса. Авторы предлагают использовать различие в средних значениях приведенной пиковой электронной концентрации в северном и южном полушариях Марса для выявления эффекта присутствия сильных палеомагнитных полей на юге планеты. Тем не менее, в работе [9] не учтен эффект солнечного излучения. В данной работе проанализирован возможный вклад крайнего ультрафиолетового излучения в средние значения характеристик ионосферы.

**Таблица 1.**

	$\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$ , $10^{10} \text{ см}^{-2}$	$\langle (E_{10.7})^{1/2} \rangle$	Расстояние Марс-Солнце $D_{SM}$ , $10^{11}$ м	$\langle (E_{10.7})^{1/2} \rangle / D_{SM}$
Север	6.48	13.4	2.47	5.4
	6.28	13.6	-	5.5
	5.89	13.4	-	5.4
Юг	6.72	11.4	2.36	4.8

Расстояние Марс-Солнце в период исследования ионосферы северного полушария было немного большим, чем во время проведения измерений в южном полушарии. Для адекватного представления потока крайнего ультрафиолетового излучения в окрестности Марса используется величина  $\langle (E_{10.7})^{1/2} \rangle / D_{SM}$ , учитывающая ослабление солнечного излучения с расстоянием. Как видно из таблицы 1, величина  $\langle (E_{10.7})^{1/2} \rangle / D_{SM}$ , в среднем, была меньше во время сессии в южном полушарии, по сравнению с северным полушарием. Тем временем другая величина  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$ , в среднем, больше для южного полушария. Из соотношения (2) следует, что большему значению  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  соответствует либо больший поток излучения  $\langle (E_{10.7})^{1/2} \rangle / D_{SM}$ , либо большая электронная температура  $T_e$ . Первое предположение исключается на основе вышесказанного. Поэтому

напрашивается единственный вывод: электронная температура  $T_e$  в южном полушарии должна быть, в среднем, выше, чем в северном полушарии.

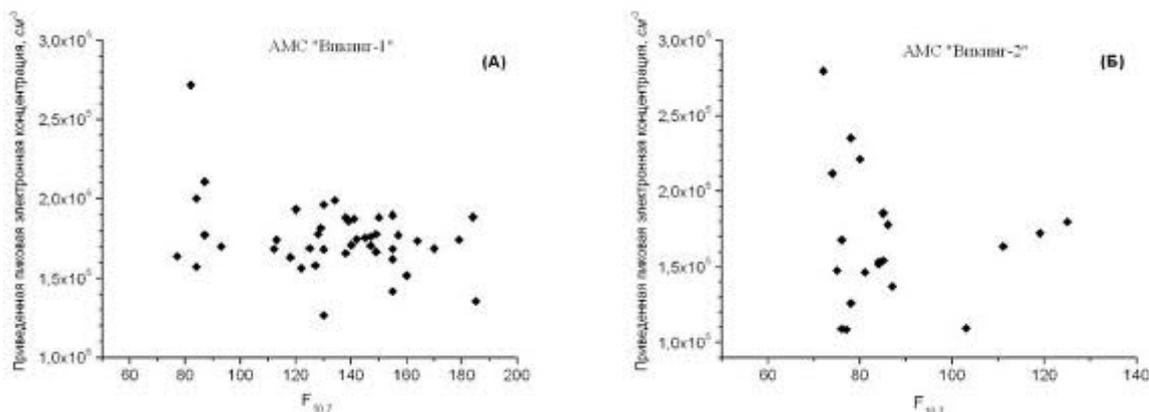
Причина данного явления заключается в присутствии в южном полушарии Марса сильных палеомагнитных полей. «Горячие» электроны, находящиеся на замкнутых силовых линиях магнитных полей, задерживаются внутри крупномасштабных мини-магнитосфер, и тем самым электронная температура  $T_e$  становится своеобразным индикатором присутствия магнитного поля в ионосфере [9]. Таким образом, повышенное значение  $T_e$  в южном полушарии свидетельствует о наличии в исследованном широтном интервале от  $69^\circ$  ю.ш до  $64.5^\circ$  ю.ш. достаточно сильных палеомагнитных полей, захватывающих «горячие» электроны. Надо отметить, что данный эффект является хоть и измеримым, но все же достаточно умеренным.

В период измерений в северном полушарии с 1 по 31 января 2001 г. корреляция между величиной  $\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle$  и  $(E_{10.7})^{1/2}$  значительно меньше (или практически отсутствует), чем в ноябре-декабре 2000 г. Согласно соотношению (2) это означает, что: а) вариации электронной температуры  $T_e$  в январе 2001 г. были очень сильными и б) корреляция между  $T_e$  и  $E_{10.7}$  была незначительной. Учитывая, что палеомагнитные поля в северном полушарии достаточно слабые, электронная температура  $T_e$  с большой долей вероятности, в данном отдельно взятом случае, регулируется посредством взаимодействия солнечного ветра с марсианской атмосферой/ионосферой.

Как было показано выше, для массива данных, полученных в ноябре 2000 г. – январе 2001 г.,  $d \ln \langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle / d \ln(E_{10.7}) \approx 0.37 \pm 0.06$ . Это значение существенно меньше ожидаемого значения 0.5, получаемого из соотношения (2), если вариации температуры  $T_e$  незначительны. Отсюда мы делаем вывод, что в ноябре – декабре 2000 г. электронная температура  $T_e$  и индекс  $E_{10.7}$  антикоррелировали, т.е. при увеличении  $E_{10.7}$  электронная температура обычно падала и наоборот.

Еще один важный показатель, извлеченный из анализа данных за период с ноября 2000 г. по январь 2001 г., – это  $d \ln \langle H_n \rangle / d \ln(E_{10.7}) \approx 0.14 \pm 0.09$ . Среднее значение  $d \ln \langle H_n \rangle / d \ln(E_{10.7})$  очень близко к значению 0.16, найденному в работе [1]. В то же время, неопределенность в параметре подгонки сама по себе сравнима по величине с полученным средним значением, даже если топографический и палеомагнитный эффекты минимизированы. Ни в работе [1], ни в [2] последние эффекты не были исключены. Например, существующий разброс значений приведенной пиковой электронной

концентрации для данных аппаратов «Викинг-1» и «Викинг-2» слишком большой [13] (рис. 7).



**Рис. 7.** Приведенная пиковая электронная концентрация  $n_{peak} / \sqrt{\cos \chi}$  как функция потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см  $F_{10.7}$  (данные получены автоматическими межпланетными станциями (АМС) «Викинг-1,2»).

#### Литература

1. Bauer S.J., Hantsch M.H. Solar cycle variation of the upper atmosphere temperature of Mars, *Geophys. Res. Lett.*, v. 16(5), 373–376, 1989.
2. Breus T.K., Pimenov K.Yu., Izakov M.N., Krymskii A.M., Luhmann J.G., Kliore A.J. Conditions in the Martian ionosphere/atmosphere from a comparison of a thermospheric model with radio occultation data, *Planet. Space Sci.*, v. 46, № 4, 367–376, 1998.
3. Изиков М.Н., Ростэ О.З. Вариации структуры верхней атмосферы Марса // *Космич. исслед.* 1996. Т. 34. № 3. С. 289–299.
4. Keating G.M., S.W. Bougher, R.W. Zurek, R.H. Tolson, G.J. Cancro, S.N. Noll, J.S. Parker, T.J. Schellenberg, R.W. Shane, B.L. Wilkerson, J.R. Murphy, J.L. Hollingsworth, R.M. Haberle, M. Joshi, J.C. Pearl, B.J. Conrath, M.D. Smith, R.T. Clancy, R.C. Blanchard, R.G. Wilmouth, D.F. Rault, T.Z. Martin, D.T. Lyons, P.B. Esposito, M.D. Johnston, C.W. Whetzel, C.G. Justus, and J.M. Babicke. The structure of the upper atmosphere of Mars: In situ accelerometer measurements from Mars Global Surveyor, *Science*, v. 279, 1672–1676, 1998.
5. Bougher S.W., S. Engel, D.P. Hinson, J.M. Forbes. Mars Global Surveyor Radio Science electron density profiles: Neutral atmosphere implications, *Geophys. Res. Lett.*, v. 28(16), 3091–3094, 2001.

6. Forbes, J. M., M. E. Hagan. Diurnal Kelvin wave in the atmosphere of Mars: Towards an understanding of 'stationary' density structures observed by the MGS accelerometer, *Geophys. Res. Lett.*, v. 27(21), 3563-3566, 2000.
7. Wilson R. J., Evidence for nonmigrating thermal tides in the Mars upper atmosphere from the Mars Global Surveyor Accelerometer Experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (7), 2002.
8. Jeffrey M. Forbes, Alison F. C. Bridger, Stephen W. Bougher, Maura E. Hagan, Jeffery L. Hollingsworth, Gerald M. Keating, James Murphy. Nonmigrating tides in the thermosphere of Mars, *J. Geophys. Res.*, v. 107 (E11), 5113, 2002.
9. Krymskii A. M., T. K. Breus, N. F. Ness, D. P. Hinson, D. I. Bojkov. 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 on board Mars Global Surveyor, *J. Geophys. Res.*, v. 108 (A12), 1431, 2003.
10. Biondi M.A. Charged-particle recombination processes, in Reaction Rate Handbook, Rep. DNA 1948H, pp. 1–16, Def. Nucl. Agency, Department of Defense Information Analysis Center, Santa Barbara, California, 1972.
11. Krymskii A. M., T. K. Breus, N. F. Ness, M. H. Acuña, J. E. P. Connerney, D. H. Crider, D. L. Mitchell, and S. J. Bauer. Structure of the magnetic field fluxes connected with crustal magnetization and topside ionosphere at Mars, *J. Geophys. Res.*, v. 107 (A9), 1245, 2002.
12. Mitchell, D. L., R. P. Lin, C. Mazelle, H. Rème, P. A. Cloutier, J. E. P. Connerney, M. H. Acuña, N. F. Ness. Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS Electron Reflectometer, *J. Geophys. Res.*, v. 106(E10), 23419-23428, 2001.
13. Lindal G. F., Hotz H. B., Sweetnam D. N., Shippony Z., Brenkle J. P., Hartsell G. V., Spear R. T. Viking radio occultation measurements of the atmosphere and topography of Mars – Data acquired during 1 Martian year of tracking, *J. Geophys. Res.*, v. 84, 8443-8456, 1979.