

УДК 52-726

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА СОСТОЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ МАРСА

© 2010 г. Д.И. Божков¹, А.М. Крымский²

¹Северо-Кавказская академия государственной службы,
ул. Пушкинская 70, г. Ростов н/Д, 344007,
rector@skags.ru

¹North Caucasian Academy of Public Administration,
Pushkinskaya St., 70, Rostov-on-Don, 344007,
rector@skags.ru

²Научно-исследовательский институт физики
Южного федерального университета,
пр. Стачки, 194, г. Ростов н/Д, 344090

²Research Institute of Physics
of Southern Federal University,
Stachki Ave, 194, Rostov-on-Don, 344090

Данные радиозатменного эксперимента на КА «Mars Global Surveyor» и измерений потока солнечного ветра на КА «АСЕ» использованы для изучения влияния высокоскоростных потоков солнечного ветра на величину главного максимума в ионосфере Марса вблизи максимума и на стадии спада солнечной активности. Показано, что появление высокоскоростных потоков сильно ослабляет корреляцию между величиной главного максимума и квадратным корнем из индекса $E_{10.7}$, который характеризует интегральный поток ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: ионосфера, солнечная активность, солнечный ветер, Марс.

Data of radio occultation experiment onboard spacecraft «Mars Global Surveyor» and solar wind fluxes measured onboard spacecraft «АСЕ» have been utilized for studying effect of high speed streams of the solar wind on the main peak magnitude in the Martian ionosphere close to the last solar activity maximum and during solar activity decline. It is shown that appearance of the high speed streams diminishes correlation between the effective main peak magnitude and square root of $E_{10.7}$ index which characterizes integral flux of the ultraviolet radiation.

Keywords: ionosphere, solar activity, solar wind, Mars.

Электромагнитное излучение Солнца, диссипация токов, индуцированных взаимодействием с солнечным ветром (СВ) и межпланетным магнитным полем (ММП), и кинетическая энергия низкоэнергичных частиц СВ (в первую очередь, электронов) – это три основных источника энергии в ионосфере/термосфере любой из планет земной группы [1].

Различные механизмы передачи энергии в атмосферу распределены неоднородно. Эффективность нагрева УФ-излучением изменяется с высотой, но в среднем примерно равна 50 % [2]. Модель SOLAR2000 [3] предсказывает, что приблизительно вне зависимости от уровня солнечной активности энергия УФ-излучения поглощается в термосферном слое 150–200 км. Индекс модели солнечного излучения SOLAR2000 $E_{10.7}$ представляет собой интегральный поток энергии УФ-излучения в диапазоне длин волн от 1 до 105 нм на верхней границе атмосферы. $E_{10.7}$ измеряется в тех же единицах, что и $F_{10.7}$ [2]. Преимущество индекса $E_{10.7}$ по сравнению с $F_{10.7}$ состоит в том, что $E_{10.7}$ характеризует реальную энергию солнечного излучения, идущую на фотоионизацию или после поглощения на нагрев термосферы, что позволяет использовать его напрямую при численном моделировании [2].

Примерно 60 % энергии, передаваемой от СВ земной магнитосфере, в конечном итоге диссипирует в системе ионосфера–термосфера–мезосфера [4]. Непрямая диссипация энергии идет двумя путями: выделение тепла при диссипации токов и попадание низкоэнергичных частиц в авроральные зоны.

Низкоэнергичные электроны в основном выделяют энергию в высотном интервале 100 – 120 км [5]. В случае авроральных высыпаний эффективность нагрева составляет около 50 % [6]. Омическая диссипация токов (джоулев нагрев) в основном происходит в интервале 110 – 140 км [7]. При джоулевом нагреве эффективность передачи энергии нейтральной атмосфере близка к 100 % [6]. Таким образом, даже относительно небольшое усиление диссипации токов ведет к тому, что она начинает конкурировать с УФ-излучением за роль главного механизма нагрева верхней атмосферы Земли [1].

В среднем в глобальных масштабах энергия, передаваемая в процессе взаимодействия СВ с магнитосферой, играет вторичную роль в энергобалансе атмосферы. Однако в случаях экстремального взаимодействия ситуация изменяется, и джоулев нагрев сравнивается или даже превосходит энергетический вклад УФ-излучения Солнца. В результате верхняя атмосфера переполняется энергией, поскольку вклад УФ-излучения и так выше среднего.

В нашей статье данные о распределении плазмы вблизи Марса, полученные в результате ее радиопросвечивания с борта космического аппарата «Марс Глобал Сурвейор», используются для изучения влияния изменений потока УФ-излучения Солнца и высокоскоростных потоков плазмы на ионосферу и термосферу Марса, а также обсуждается корректировка данных о потоке УФ-излучения и о СВ (космической погоде), которые были получены в окрестности Земли и необходимы для анализа влияния космической погоды на ионосферу и термосферу Марса.

Корректировка околоземных измерений потока жесткого УФ-излучения Солнца и характеристик потока СВ с учетом взаимного расположения тел в системе Земля–Солнце–Марс

Вблизи Марса в период проведения радиозатменных экспериментов поток УФ-излучения Солнца не мониторировался. Поэтому для изучения отклика ионосферы и термосферы Марса на УФ-излучение Солнца необходимо найти замену-суррогат потоку УФ-излучения.

В спектре индекса $E_{10,7}$ имеется явно выраженный пик, соответствующий периоду, примерно равному 28,6 дня, что близко к периоду коррингтоновского вращения [1]. При таких условиях можно пренебречь изменением потока излучения, исходящего из какой-то фиксированной области на поверхности Солнца, за время одного оборота Солнца.

Эксперимент SWEPAM по измерению характеристик СВ на борту КА «Advanced Composition Explorer» (ACE) начался в 1998 г. и продолжается по настоящий момент. Таким образом, данные о свойствах СВ в окрестности Земли имеются, но они должны быть соответствующим образом скорректированы, чтобы по ним можно было судить о свойствах СВ в окрестности Марса.

В спектре индекса $E_{10,7}$, характеризующего поток УФ-излучения Солнца, пики, соответствующие периодам 13–14 и 6–7 дней, не выражены (рис. 1а). В то же время в период 2002–2003 гг. в спектре потока энергии СВ имеются хорошо выраженные пики, которые соответствуют периодам 26–28, 13–14 и 6–7 дней (рис. 1б).

Эти пики указывают на присутствие высокоскоростных коротационных потоков в СВ. Поскольку в случае высокоскоростного коротационного потока СВ поток кинетической энергии повышается в несколько раз по сравнению со средними значениями, то поступление энергии от джоулевой диссипации токов, вызванных проникновением ММП, и высыпания частиц СВ может не коррелировать с потоком УФ-излучения Солнца.

Если необходимо восстановить свойства СВ в окрестности Солнца по данным околоземных наблюдений, то обычно делают предположение, что скорость потока СВ остается постоянной все то время, которое требуется потоку СВ, чтобы пройти от Солнца до Земли. Таким образом, чем больше времени требуется потоку СВ, чтобы пройти от Солнца до Земли, тем

более постоянной должна быть скорость потока СВ в окрестности Солнца в период, предшествующий околоземному наблюдению, для того, чтобы восстановление свойств СВ в окрестности Солнца было бы надежным.

Прогноз характеристик СВ в окрестности Марса по данным околоземных измерений основывается на следующих двух предположениях:

1. Радиальная компонента скорости СВ «несущественно» изменяется за то время, что СВ проходит расстояние от орбиты Земли до орбиты Марса. Например, если радиальная составляющая скорости потока v_r нарастает, т.е. dv_r/dt положительна на орбите Земли, то до прохождения потоком СВ орбиты Марса более высокоскоростной СВ не успевает догнать своего более медленного предшественника, если выполнены условия отсутствия пересечения «характеристик» течения:

$$\frac{l}{v_r(v_r + \Delta v_r)} < \frac{1}{dv_r/dt} \text{ или более приближенно}$$

$$\frac{dv_r}{dt} \frac{l}{(v_r)^2} < 1. \quad (1)$$

Здесь l – расстояние между орбитами Марса и Земли.

2. Пространственная неоднородность потока СВ внутри угла Марс–Солнце–Земля незначительна.

Пример временной последовательности значений радиальной составляющей скорости СВ, полученной в эксперименте SWEPAM на борту КА ACE, и коэффициент автокорреляции $\langle v_r(t)v_r(t + \tau) \rangle$ как функция временного сдвига τ представлены на рис. 2.

В среднем расстояние от Марса до Солнца составляет 1,5 а.е., так что поток СВ с радиальной скоростью 300–700 км/с проходит расстояние от орбиты Земли до орбиты Марса за 1,3–2,9 дня. Даже если не учитывать ненулевой угол Марс–Солнце–Земля и зависимость скорости СВ от гелиографической долготы (пространственную неоднородность потока СВ), то, согласно (1), экстраполяция характеристик СВ, измеренных вблизи орбиты Земли, на орбиту Марса дает надежные результаты только тогда, когда v_r постепенно нарастает не более чем на 200 км за 2 дня. Очевидно, что вероятность такой ситуации невелика, поскольку, как можно видеть из рис. 2, коэффициент автокорреляции $\langle v_r(t)v_r(t + \tau) \rangle$ убывает до 0,3÷0,4 в течение 2 дней.

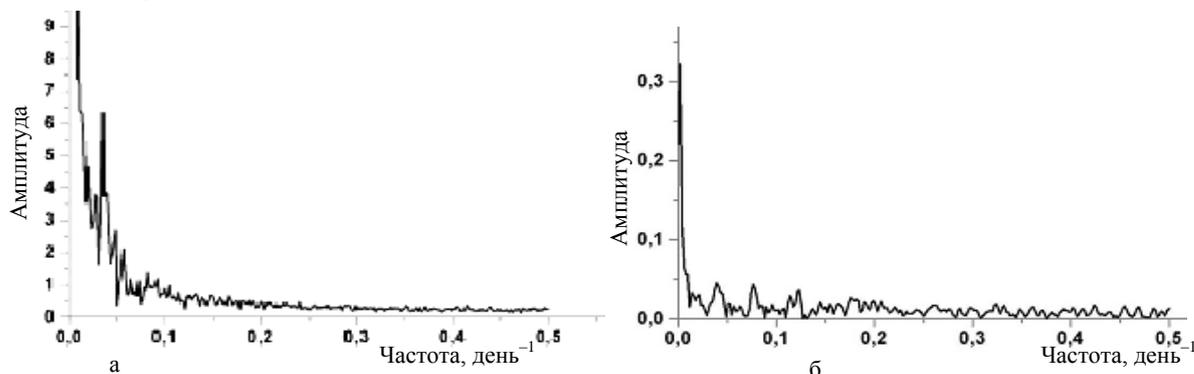


Рис. 1. Спектр потока энергии протонов СВ и индекса потока УФ-излучения $E_{10,7}$ за период сутки 165, 2002 г. – сутки 100, 2003 г.

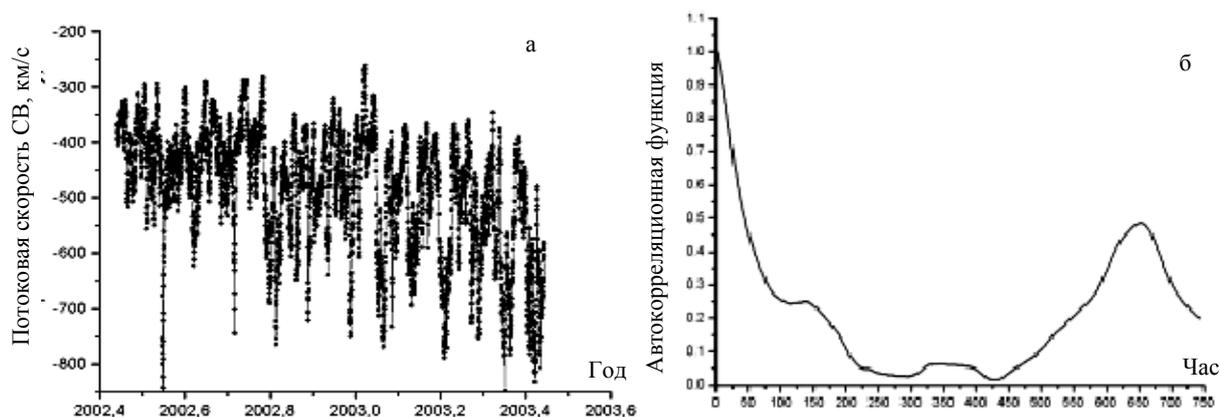


Рис. 2. а – составляющая потоковой скорости СВ в антисолнечном направлении, v_r ;
б – зависимость автокорреляционной функции $\langle v_r(t)v_r(t + \tau) \rangle$ от временного сдвига τ , дней

Если в СВ существуют локализованные по географической долготе коротационные потоки, то вследствие условия коротации во временной серии параметров СВ, измеренной на борту ACE, собственно временные и пространственные вариации наложены друг на друга.

Как видно из рис. 2, в период с 2002,4 г. по 2002,8 г. v_r превышало значение 600 км/с всего в несколько раз. В такой ситуации характеристики СВ, измеренные вблизи Земли, могут быть достаточно надежно экстраполированы в окрестности Марса. Затем высокоскоростные потоки СВ стали появляться чаще.

На рис. 3 показано динамическое давление СВ, вычисленное с использованием часовых средних характеристик СВ, измеренных в эксперименте SWERAM на борту ACE. Имеются периоды, когда вычисленное динамическое давление увеличивается на десятки и даже сотни процентов в течение часа. В то же время распределение логарифма динамического давления в течение периода каррингтоновского вращения близко к нормальному закону.

Сегодня нескорректированные данные эксперимента SWERAM позволяют проанализировать изменчивость СВ вблизи Марса лишь на временных масштабах, сопоставимых или превосходящих период каррингтоновского вращения.

Воздействие солнечного ветра на ионосферу в северном полушарии Марса

Согласно [8], комбинация $n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}$ пропорциональна $(I_\infty)^{0,5}(T_e)^{0,3}$, где I_∞ – интегральный поток УФ-излучения на высоте максимума ионизации. Таким образом, если будет найдена зависимость $n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}$ от местного времени Марса (МВМ), то это будет проявлением временных изменений I_∞ (в тех случаях, когда МВМ коррелирует с датой) и/или зависимости T_e от МВМ.

Как видно из рис. 4 а, в период день 32, 2001 г. – день 115, 2001 г. зависимость n_{peak} от МВМ была существенной. Но причиной зависимости не обязательно должно быть само МВМ, поскольку, как видно из рис. 4 б, в анализируемый период МВМ в точке, в которой происходило радиозатмение MGS, коррелировало с датой и, соответственно, с величиной I_∞ .

Для проверки того, действительно ли временные изменения I_∞ в основном определили зависимость n_{peak} от МВМ в анализируемый период, были сопоставлены $n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}$ и индекс $E_{10,7}$. Как видно из рис. 4 в, г, $n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}$ практически следовало за

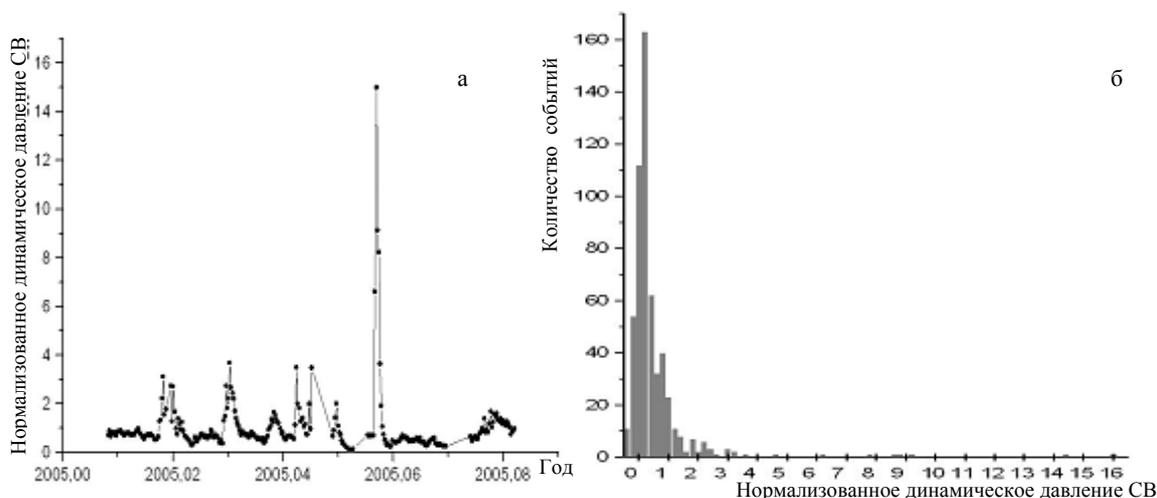


Рис. 3. а – временная последовательность значений динамического давления СВ, отнесенных к среднему за период значению $\langle p_{sw}/\langle p_{sw} \rangle$. Данные представлены для одного каррингтоновского периода;
б – гистограмма значений динамического давления СВ, отнесенных к среднему за период значению

индексом $E_{10,7}$. Это указывает на то, что зависимость T_e от МВМ была несущественной, если T_e вообще зависит от МВМ.

Далее для численной оценки влияния изменений T_e , был рассчитан коэффициент корреляции суточного среднего $n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}$: $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi} \rangle\rangle$ и $\sqrt{E_{10,7}}$, а также $d\ln\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi} \rangle\rangle/d\ln E_{10,7}$. Были использованы данные, полученные в периоды день 336, 2000 г. – день 31, 2001 г. и день 305–365, 2002 г. Эти интервалы были выбраны потому, что, как можно видеть из рис. 5, они сравнимы, а зависимость n_{peak} от солнечно-зенитного угла (СЗУ) можно хорошо аппроксимировать функцией $\sqrt{\cos\chi}$. Различие в величине коэффициента корреляции и $d\ln\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi} \rangle\rangle/d\ln E_{10,7}$, вычисленных для вышеуказанных временных интервалов: день 336, 2000 г. – день 31, 2001 г. и день 305–365, 2002 г., (если таковое обнаружено) указывает на годовые/в цикле солнечной активности изменения в ионосфере/термосфере.

Для сравнения используемые данные были разделены на четыре набора, в каждом из которых содержатся данные, полученные в течение примерно одного месяца, т.е. за период чуть больший, чем период каррингтоновского вращения. Затем были сформированы две пары наборов для сравнения: пара а – данные, полученные в период день 305–335, 2002 г., и

набор данных, полученных в период день 336–366, 2000 г.; пара б – набор данных, полученных в период день 336–365, 2002 г., и набор данных, полученный в период день 1–31, 2001 г. Таким образом, в каждой паре наборы данных разделены временным промежутком, примерно равным одному марсианскому году.

Для каждого набора данных был вычислен коэффициент корреляции $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi} \rangle\rangle$ и $\sqrt{E_{10,7}}$ при разных значениях временного сдвига между ними. Для сравнения в каждой выбранной паре эти коэффициенты корреляции представлены на рис. 5 а, б.

В период день 336–366, 2000 г. максимальное значение коэффициента корреляции было 0,6, что существенно больше, чем 0,3 – максимальное значение коэффициента корреляции в период день 305–335, 2002 г. Далее в период день 1–31, 2001 г. корреляция между $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi} \rangle\rangle$ и $\sqrt{E_{10,7}}^{1/2}$ вообще отсутствовала, тогда как в период день 336–365, 2002 г. максимальное значение коэффициента корреляции приближенно равнялось 0,4. Анализ изменений ото дня ко дню индекса $E_{10,7}$ и потока энергии протонов СВ позволяют выяснить причины различий. Для 81 последовательно взятого дня, начиная со дня – 15 относительно начальной даты каждого из анализируемых временных промежутков: день 336, 2000 г. – день 31, 2001 г. и дни 305–365, 2002 г., индекс $E_{10,7}$ и поток энергии протонов СВ показаны на рис. 4 в, г соответственно.

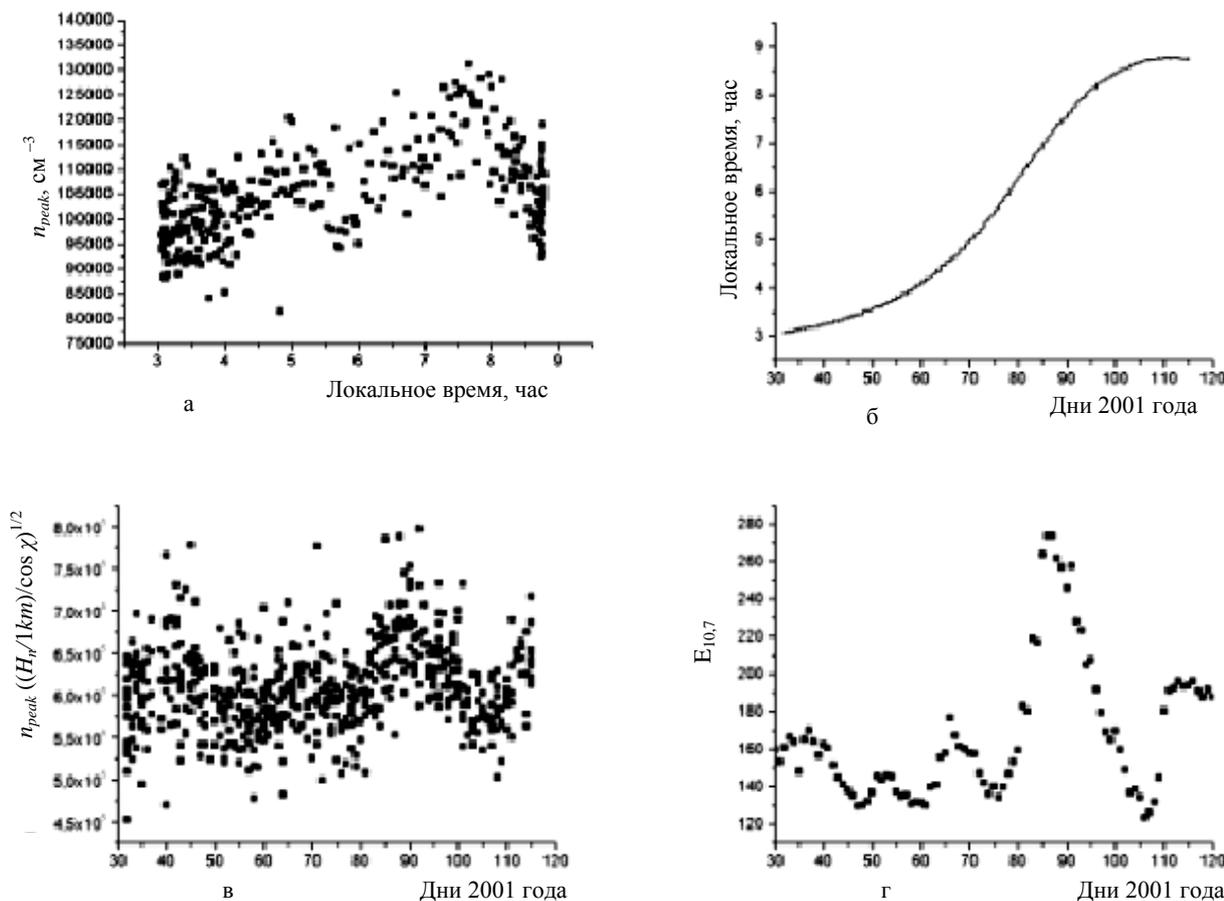


Рис. 4. а – зависимость n_{peak} от МВМ в дни 32–115, 2001 г.; б – изменение МВМ ото дня ко дню в тот же период времени; в, г – изменения $n_{peak}\sqrt{(H_n/1km)/\cos\chi}$ и $E_{10,7}$ ото дня ко дню в тот же период времени

Как видно из рис. 5, в 2000–2001 гг., за исключением периода со дня –15 по день 15, индекс $E_{10,7}$ довольно постепенно снижался. В январе 2001 г. индекс $E_{10,7}$ был примерно неизменен, и $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle$ и $(E_{10,7})^{1/2}$ не коррелировали друг с другом. Таким образом, изменения $E_{10,7}$ не определяют изменений величины $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle$, если $E_{10,7}$ изменяется слабо. В течение другого анализируемого периода, в 2002 г., индекс $E_{10,7}$ был меньше, чем одним марсианским годом ранее, но значительно более изменчивым.

В спектре потока энергии протонов СВ, построенного по данным за 2002–2003 гг., имеются отчетливые пики, которые соответствуют периодам 26–28, 13–14 и 6–7 дней. Это может указывать на присутствие коротационных потоков. В то же время в спектре индекса $E_{10,7}$, построенного для того же временного промежутка, пики, которые соответствуют периодам 13–14 и 6–7 дней, отсутствовали (рис. 5 г).

Поток энергии, связанный с высокоскоростным коротационным потоком, в несколько раз больше, чем среднее значение потока энергии СВ. В таких условиях поступление энергии СВ через высыпание энергичных частиц СВ и джоулев нагрев может быть настолько изменчивым, что изменения температуры электронов T_e , связанные с высыпанием энергичных частиц СВ и джоулевым нагревом, могут превосхо-

дить влияние изменений в потоке УФ-излучения. Поэтому на Марсе на стадии спада солнечной активности, когда появляются коротационные высокоскоростные потоки, корреляция между $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle$ и $(E_{10,7})^{1/2}$ может быть весьма слабой.

Наконец, данные радиозатменного эксперимента на MGS были использованы для вычисления $d \ln \langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle / d \ln E_{10,7}$. Вычисления проводились отдельно для каждого из временных интервалов длиной примерно в один месяц. При вычислении $d \ln \langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle / d \ln E_{10,7}$ индекс $E_{10,7}$ сдвигался на число дней, которое определялось текущим значением угла между Марсом, Солнцем и Землей в гелиоцентрической системе координат. Для проанализированных временных промежутков вычисленные значения $d \ln \langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle / d \ln E_{10,7}$ представлены в таблице.

Вычисленные значения

Временной интервал, дни	$d \ln \langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle / d \ln E_{10,7}$
336–366, 2000	0,25
1–31, 2001	–0,04
305–335, 2002	0,12
336–365, 2002	0,11

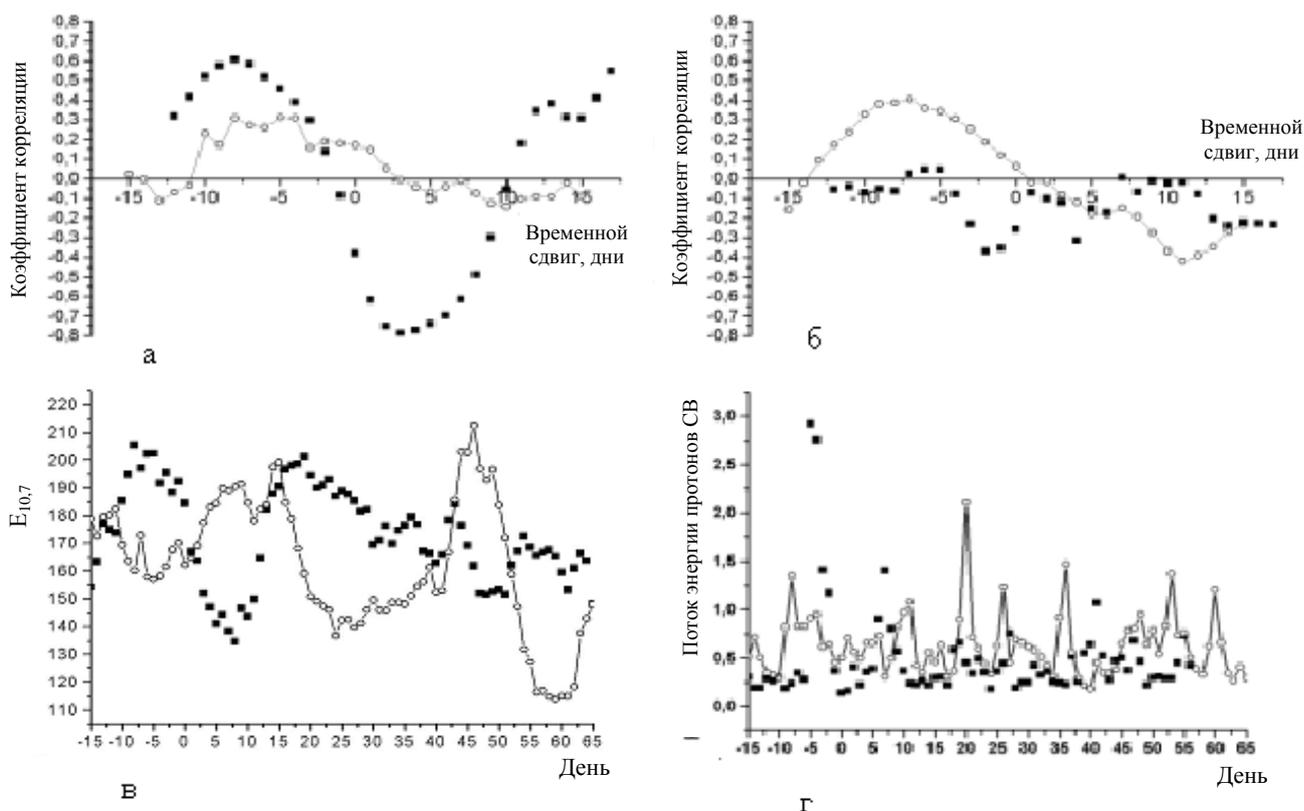


Рис. 5. а – коэффициент корреляции $\langle\langle n_{peak}\sqrt{H_n/\cos\chi}\rangle\rangle$ и $E_{10,7}$ как функция временного сдвига между рядами значений для двух временных интервалов: сутки 305–335, 2002 г. и сутки 336–366, 2000 г.; б – коэффициент корреляции для двух временных интервалов: сутки 336–365, 2002 г. и сутки 1–31, 2001 г.; в, г – индекс $E_{10,7}$ и поток энергии протонов СВ в течение 81 последовательно взятых суток. Заполненные квадраты и незаполненные круги указывают на периоды сутки 336, 2000 г. – сутки 31, 2001 г. и сутки 305–365, 2002 г. соответственно

Из вышеизложенного следует, что динамическое давление СВ, вычисленное с использованием часовых средних характеристик СВ, измеренных в эксперименте SWEPAM на борту ACE, указывает на то, что в определенные периоды вычисленное динамическое давление увеличивается на десятки и даже сотни процентов в течение часа. В то же время распределение логарифма динамического давления в течение периода каррингтоновского вращения близко к нормальному закону. Таким образом, сегодня нескорректированные данные эксперимента SWEPAM позволяют проанализировать изменчивость СВ вблизи Марса лишь на временных масштабах, сопоставимых или превосходящих период каррингтоновского вращения.

Изменения индекса $E_{10,7}$ не определяют изменений величины $\langle\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle\rangle$, если $E_{10,7}$ изменяется слабо. Поток энергии, связанный с высокоскоростным коротационным потоком, в несколько раз больше, чем среднее значение потока энергии СВ. В таких условиях поступление энергии СВ через высыпание энергичных частиц СВ и джоулев нагрев может быть настолько изменчивым, что изменения T_e , связанные с высыпанием энергичных частиц СВ и джоулевым нагревом, могут превосходить влияние изменений в потоке УФ-излучения. Поэтому на стадии спада солнечной активности, когда появляются коротационные высокоскоростные потоки, корреляция между $\langle\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle\rangle$ и $(E_{10,7})^{1/2}$ оказывается весьма слабой.

Все четыре значения $d \ln \langle\langle n_{peak} \sqrt{H_n / \cos \chi} \rangle\rangle / d \ln E_{10,7}$ существенно меньше, чем значение 0,5, которое предсказывается теорией при неизменном значении T_e . Это может быть указанием на то, что вблизи максимума солнечной активности и на стадии спада солнечной активности, на высоте максимума ионизации T_e антикоррелировало с индексом $E_{10,7}$.

Участие А.М. Крымского в работе было поддержано грантом Южного федерального университета К-07-Т-17.

Литература

1. Knipp D.J., Tobiska W.K., Emery B.A. Direct and indirect thermospheric heating sources for solar cycles 21–23 // *Solar Physics*. 2004. Vol. 224. P. 495–505.
2. Tobiska W.K. SOLAR2000 irradiances for climate change research, aeronomy and space system engineering // *Advances in Space Research*. 2004. Vol. 34. P. 1736–1746.
3. Torr M.R., Torr D.G., Richards P.G. The solar ultraviolet heating efficiency of the midlatitude thermosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1980. Vol. 7(5). P. 373.
4. Global energy deposition during the January 1997 magnetic cloud event / G. Lu [et al.] // *Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 11685.
5. Fuller-Rowell T.J., Evans D.S. Height-integrated Pedersen and Hall conductivity patterns inferred from the TIROS-NOAA satellite data // *Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 7606.
6. Neutral and ion gas heating by auroral electron precipitation / M.H. Rees [et al.] // *Geophys. Res.* 1983. Vol. 88. P. 6289.
7. Thayer J.P., Semeter J. The convergence of magnetospheric energy flux in the polar atmosphere // *Atmos. Solar Terr. Phys.* 2004. Vol. 66. P. 807.
8. The effect of the solar radiation in the topside atmosphere/ionosphere of Mars: Mars Global Surveyor observations / T.K. Breus [et al.] // *Geophys. Res.* 2004. Vol. 109.