

Том 34, Номер 6

Ноябрь - Декабрь 1996

ISSN 0023-4206

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главный редактор
Л.И. Седов

МАИК "НАУКА"



"НАУКА"

УДК 523.72:323.43

ТОРМОЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПЕРЕД ОТОШЕДШЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ОКОЛО МАРСА – ВОЗМОЖНОЕ СЛЕДСТВИЕ ПЛОТНОЙ КОРОНЫ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА

© 1996 г. Г. Котова*, М. Веригин*, А. Ремизов*, Х. Розенбауэр**, С. Сёге***,
Дж. Славин****, М. Татральи***, К. Швингеншу*****, Н. Шютте*

*Институт космических исследований РАН, г. Москва

**Институт аэронауки об-ва М. Планка, Германия

***Центральный институт физических исследований, Венгрия

****Годдардовский центр космических полетов НАСА, США

*****Институт космических исследований, Австрия

Поступила в редакцию 05.12.95 г.

По данным энергоспектрометра ТАУС, установленного на борту космического аппарата *Фобос-2*, анализируется торможение потока солнечного ветра перед головной ударной волной около Марса вблизи плоскости терминатора. Обнаружено, что величина падения скорости перед околосолнечной ударной волной, зарегистрированная на восходящих ветвях орбит (в среднем эти случаи соответствуют пересечениям квазипараллельной ударной волны), приблизительно обратно пропорциональна концентрации невозмущенного солнечного ветра, тогда как такая зависимость практически отсутствует для величин, измеренных на нисходящих ветвях орбит (в среднем они относятся к пересечениям квазиперпендикулярной ударной волны). Это, по-видимому, связано с тем, что торможение солнечного ветра перед ударной волной существенным образом определяется наличием протяженной короны нейтральных частиц около Марса, однако в случае пересечения квазиперпендикулярной ударной волны важную роль играет также нагружение потока солнечного ветра большим количеством отраженных протонов. Обнаруженная зависимость величины падения скорости перед ударной волной от концентрации невозмущенного солнечного ветра позволяет оценить плотность нейтральных частиц в короне Марса.

Торможение потока солнечного ветра перед ударной волной около Марса рассматривалось в работе Веригина и др. [1] на основе данных эксперимента ТАУС, полученных на первых трех эллиптических орбитах спутника *Фобос-2* около Марса. Скорость солнечного ветра перед ударной волной вблизи подсолнечной точки уменьшается на ~100 км/с. Подчеркивалось, что такое торможение может быть связано с нагружением потока плазмы ионами, происходящими из кислородной или водородной корон Марса, или протонами отраженными от ударной волны. Принимая во внимание только влияние кислородной короны Марса, был оценен предельный профиль плотности горячего кислорода в короне и верхний предел скорости потерь кислорода планетой. Однако полученные оценки плотности кислородной короны в 5 раз превосходили максимальную теоретическую величину плотности, рассчитанную по модели Ипа [2, 3].

Торможение солнечного ветра перед ударной волной, зарегистрированное на третьей эллиптической орбите, также рассматривалось в работе Барабаша и Лундина [4] по данным эксперимента АСПЕРА. По оценкам авторов около 60% наблюдавшегося падения скорости солнечного вет-

ра было связано с протонами, упруго отраженными от ударной волны. На основе анализа данных эксперимента АСПЕРА, полученных на первых 4-х орбитах *Фобоса-2* около Марса Дубинин и др. [5] обнаружили асимметрию возрастания плотности плазмы перед ударной волной, которую связывали с изменением ориентации межпланетного магнитного поля.

Согласно теоретическим [6–8] и экспериментальным [9, 10] исследованиям ударной волны около Земли в случае квазиперпендикулярной волны плотность упруго отраженных от нее протонов может составлять до 20–30% плотности протонов набегающего потока солнечного ветра. Эти ионы поворачиваются затем в магнитном поле солнечного ветра и возвращаются обратно к ударной волне. Торможение солнечного ветра при этом происходит на небольших расстояниях от ударной волны $\leq r_{g\perp} = V_{\perp}/\omega_{gi}$, где V_{\perp} – компонент скорости солнечного ветра, перпендикулярный фронту ударной волны, ω_{gi} – гирочастота протонов [9, 11]. В случае квазипараллельной ударной волны движение ведущего центра упруго отраженных протонов направлено от ударной волны, однако согласно наблюдениям их плот-

- та Марс-94 (МА-90) // Космич. исслед. 1991. Т. 29. Вып. 1. С. 3.
22. *Petrinec S.M., Russell C.T.* An empirical model of the size and shape of the near-Earth magnetotail // *Geophys. Res. Letters*. 1993. V. 20. № 23. P. 2695.
 23. *Schiold M.A.* Pressure balance between solar wind and magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 5. P. 1275.
 24. *Slavin J., Verigin M., Gringauz K. et al.* The solar wind interaction with Mars: Phobos-2 bow shock observations on 24 March 1989 // *Plasma environments of non-magnetic planets. COSPAR Colloquia Series, v. 4* / Ed. Gombosi T.I. Oxford; New York; Seoul; Tokyo: Pergamon Press, 1993. P. 279.
 25. *Zhang M.S.G., Luhmann J.G.* Comparison of the peak ionosphere pressure at Mars and Venus with incident solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № E1. P. 1017.
 26. *Pedersen A., Nairn C., Grard R., Schwingenschuch K.* Derivation of electron densities from differential potential measurements upstream and downstream of the bow shock and in the magnetosphere of Mars // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № A7. P. 11243.
 27. *Grard R., Pedersen A., Klimov S. et al.* First measurements of plasma waves near Mars // *Nature*. 1989. V. 341. № 6243. P. 607.
 28. *Zhang M.S.G., Luhmann J.G., Kliore A.J., Kim J.* A post Pioneer Venus reassessment of the Martian dayside ionosphere as observed by radio occultation methods // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. № B9. P. 14829.

Dependence of Martian Magnetopause Shape and Its Dimensions on Solar Wind Dynamic Pressure According to *Phobos-2* Data

M. Verigin, I. Apathi, G. Kotova, J. Lemer, A. Remizov, H. Rosenbauer, K. Szego, J. Slavin, M. Tatrallyai, K. Schwingenschuch, and N. Shutte

A semi-empirical model of the Martian magnetopause was developed according to data of the TAUS ion-spectrometer and the MAGMA magnetometer of the *Phobos-2* spacecraft for a period of solar activity maximum. The model describes a magnetopause position in the Martian magnetotail and an incident angle depending on solar wind dynamic pressure ρV^2 as well as three points of magnetospheric boundary crossing on the dayside. The shape of the magnetopause is determined in the model from the pressure balance equation on this boundary. Both magnetic pressure and ionospheric plasma pressure are taken into account. A characteristic feature of the model is that the position of the magnetopause in the subsolar region is constant for rather large values of solar wind pressure $\rho V^2 \geq 6 \times 10^{-9}$ dyn/cm².

ность составляет только $\sim 3\%$ от плотности падающего солнечного ветра [12].

Торможение солнечного ветра в среднем на 7–10 км/с наблюдается около Земли перед квазипараллельной ударной волной в области предвестников (foreshock region) [13, 14]; оно связано с так называемыми “диффузными” ионами, текущими от ударной волны. Такие ионы также должны существовать около Марса перед квазипараллельной ударной волной и тормозить поток солнечного ветра.

В настоящей работе на основе различия отражений ионов на квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударных волнах будет сделана попытка рассмотреть отдельно различные причины торможения солнечного ветра перед ударной волной. В случае нагружения солнечного ветра ионами из нейтральной короны Марса, падение скорости потока перед ударной волной обратно пропорционально концентрации солнечного ветра. Анализ такой зависимости позволит оценить вклад короны Марса в процесс торможения солнечного ветра перед ударной волной около планеты.

АППАРАТУРА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Настоящая работа основана на данных экспериментов ТАУС и МАГМА, проводившихся на борту космического аппарата *Фобос-2*. Энергоспектрометр ТАУС был специально разработан для исследования солнечного ветра и его взаимодействия с Марсом [15]. Он позволяет раздельно измерять спектры протонов, альфа-частиц и тяжелых ионов ($M/q > 3$), где M – массовое число ионов, g – его заряд в интервале энергий на единицу заряда от 30 В до 6 кВ, разделенном на 32 энергетических диапазона. Ось поля зрения прибора ($40^\circ \times 40^\circ$, 8×8 угловых секторов) отклонена на 5° от направления на Солнце для компенсации абберации прихода солнечного ветра. Полный спектр протонов измерялся за 8 с. Феррозондовый магнитометр МАГМА регистрировал один вектор магнитного поля в диапазоне ± 100 нТ с разрешением 0.05 нТ каждые 1.5 или 45 с в зависимости от моды телеметрии [16].

С 20.II по 26.III.1989 г. космический аппарат *Фобос-2* находился на приблизительно круговой орбите (~ 9500 км от центра планеты) квазисинхронной с орбитой спутника Марса Фобоса. В этот период времени прибором ТАУС регистрировались спектры протонов в диапазоне энергий 150–6000 эВ, причем передавался один спектр в 2 мин; магнитометр МАГМА каждые 45 с измерял один вектор магнитного поля. К сожалению, большую часть времени *Фобос-2* вращался и угол между его осью вращения и линией Марс–Солнце иногда достигал 20° . По этой причине в настоящей работе будет использоваться только модуль магнитного поля.

Пересечения ударной волны идентифицировались по внезапному падению средней энергии и уширению спектров протонов и по одновременному возрастанию величины магнитного поля [17, 18]. В случае регистрации многократных пересечений ударной волны рассматривались данные перед самым внешним пересечением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа торможения солнечного ветра перед ударной волной около Марса по данным эксперимента ТАУС было рассмотрено 41 пересечение ударной волны при входе спутника в магнитосферу планеты и 29 пересечений при выходе спутника из нее. Одновременные данные по магнитному полю имеются для 36 и 26 пролетов ударной волны соответственно. (Несколько пролетов были исключены из рассмотрения, так как на них наблюдались сильные вариации скорости солнечного ветра вблизи околomarсианской ударной волны).

Вблизи орбиты Марса средний угол между направлением спирального магнитного поля Марса и линией Солнце–Марс составляет $\sim 56^\circ$. Это означает, что в среднем квазиперпендикулярная ударная волна чаще наблюдается с вечерней стороны при входе спутника в магнитосферу планеты, а квазипараллельная ударная волна – с утренней стороны при выходе спутника из магнитосферы. Из-за вращения космического аппарата на большинстве орбит невозможно надежно определить, пересекал ли спутник квазипараллельную или квазиперпендикулярную ударную волну в каждом конкретном случае. Некоторые выводы можно сделать только на основе анализа изменения модуля магнитного поля при пересечении ударной волны.

На рис. 1 приведены примеры изменения параметров солнечного ветра при пересечении околупланетной ударной волны при входе космического аппарата в магнитосферу и при выходе из нее. На обоих пролетах аппарат вращался, но отсутствие значительных регулярных вариаций плотности солнечного ветра указывает на то, что ось вращения аппарата (и, следовательно, ось поля зрения ТАУСа) была направлена приблизительно на Солнце. 2.III в 23.37 UT *Фобос-2* пересек квазиперпендикулярную ударную волну, что видно по профилю изменения величины B магнитного поля с характерными подножием и “овершутом”. С использованием модели околomarсианской ударной волны [19, 20] по восстановленным с учетом вращения аппарата данным по магнитному полю был оценен угол между направлением межпланетного магнитного поля и нормалью к ударной волне: $\theta_{BN} \sim 67^\circ$. 2.III в 03.19 UT аппарат пересек квазипараллельную ударную волну ($\theta_{BN} \sim 40^\circ$). Видно, что при входе спутника в магнитосферу наблюдается достаточно резкое сильное торможение солнечного ветра перед ударной волной, тогда как при вы-

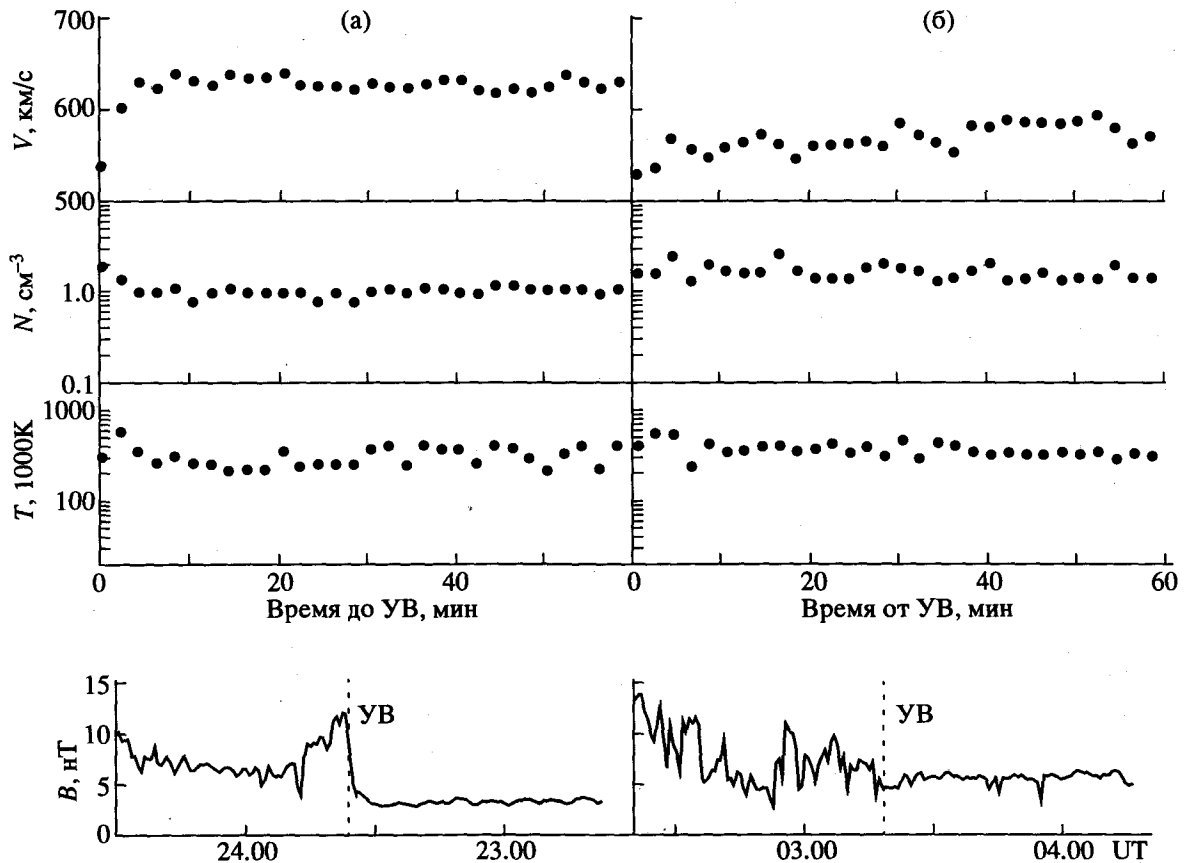


Рис. 1. Вариации параметров солнечного ветра перед околопланетной ударной волной (УВ) при входе спутника в магнитосферу 2.П в 23.37 UT (а) и при выходе из нее 2.П в 03.19 UT (б).

ходе из магнитосферы наблюдается только постепенное торможение солнечного ветра.

Для того чтобы показать разницу между пересечениями магнитопаузы на нисходящих и восходящих ветвях орбит спутника, очевидно отражающую разницу между пересечениями квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударной волны, на рис. 2 показаны вариации средних нормированных параметров протонов солнечного ветра – скорости, плотности и температуры – перед ударной волной ($V_{св}$, $N_{св}$, $T_{св}$ – скорость, плотность и температура протонов солнечного ветра, соответственно усредненные за ~20-минутный интервал времени, отстоящий по времени на ~50 мин от пересечения космическим аппаратом ударной волны.) На рис. 2а показаны эти параметры, средние для всех пересечений ударной волны при входе спутника в магнитосферу (светлые кружки) и при выходе из нее (темные кружки). Падение скорости перед ударной волной составляет в среднем ~7% от скорости солнечного ветра $V_{св}$ при входе спутника в магнитосферу и ~4% – при выходе из нее, при этом в первом случае наблюдается более резкое падение скорости перед ударной волной. Такое резкое торможение потока на нис-

ходящей ветви орбиты, по-видимому, связано с достаточно большим количеством в подножии ударной волны отраженных от квази-перпендикулярной ударной волны протонов. Напротив, более плавное уменьшение скорости солнечного ветра при приближении к ударной волне на восходящей ветви орбиты, вероятно, связано с нагружением потока ионами кислорода и водорода, происходящими из марсианской короны. При входе спутника в магнитосферу воздействие корональных ионов сопровождается более сильным нагружением потока упруго отраженными протонами.

На рис. 2б показаны средние профили нормированных скорости, плотности и температуры солнечного ветра, усредненные в зависимости от величины отношения $B_m/B_{св}$, где $B_{св}$ – магнитное поле солнечного ветра, усредненное за те же интервалы времени, что и остальные параметры, B_m – магнитное поле в переходной области (магнитошисе) за овершутом. Светлыми кружками показаны средние параметры солнечного ветра, соответствующие пересечениям ударной волны, когда отношение $B_m/B_{св}$ было больше 2.3, а темные кружки – $B_m/B_{св} < 2.3$. Такое разделение данных также может отражать разницу между пере-

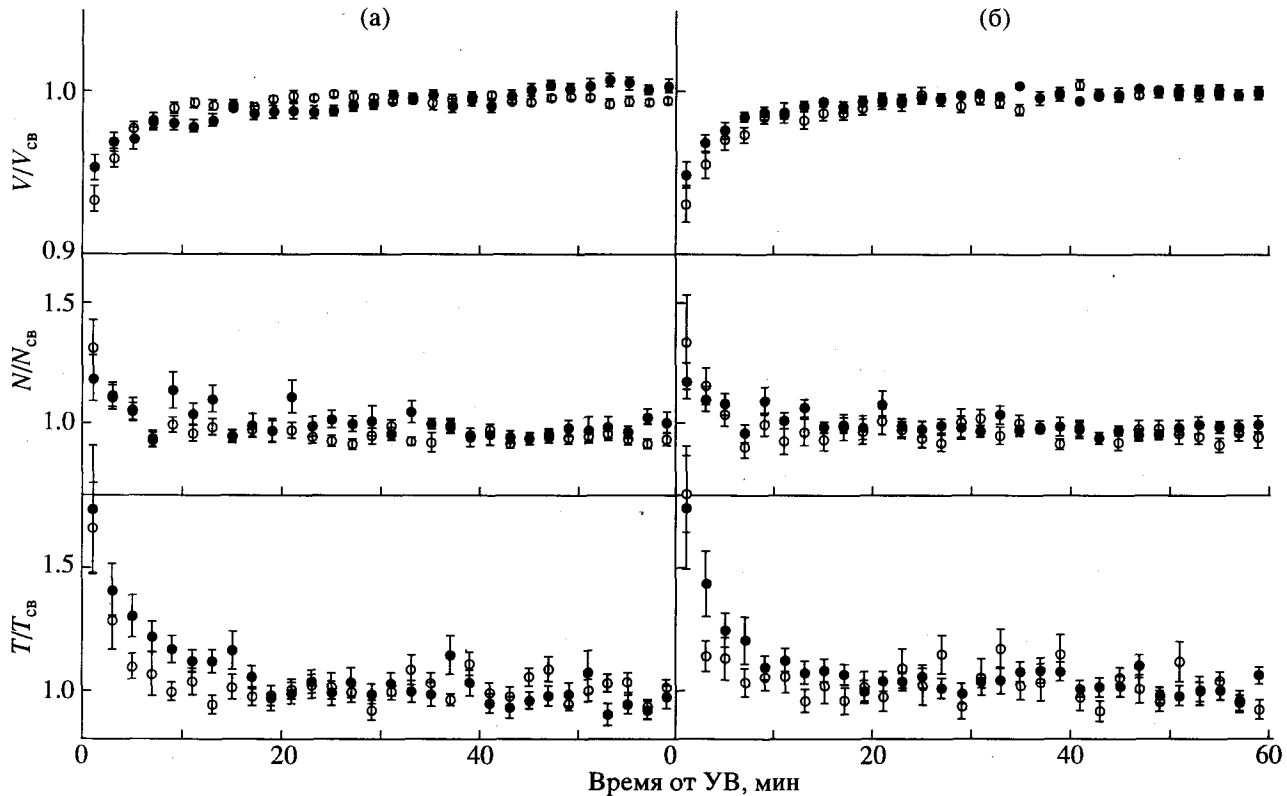


Рис. 2. Вариации средних относительных параметров солнечного ветра перед околомарсианской ударной волной. Отрезками прямых показаны среднеквадратичные отклонения рассчитанных средних параметров.

сечениями квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударной волны (см., например, рис. 9, 10 в работе [21], если принимать во внимание, что магнитозвуковое число Маха почти все время в течение круговых орбит *Фобоса-2* было больше 3). Изменение нормированных параметров на рис. 2б аналогично изменению на рис. 2а. Разница между профилями плотности на рис. 2а и 2б качественно соответствует асимметрии изменения плотности перед ударной волной в подсолнечной области, рассмотренной в работе [5].

Для того чтобы проверить предположение, действительно ли торможение солнечного ветра перед околопланетной квазипараллельной ударной волной связано в основном с нагружением потока ионами планетного происхождения, рассмотрим зависимость падения скорости солнечного ветра от его плотности.

В работе Веригина и др. [1] использовалась система гидродинамических уравнений [22], описывающая процесс нагружения потока солнечного ветра ионами планетного происхождения:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(NV) &= 0, \\ \operatorname{div}(\rho V) &= Q, \\ \rho(\mathbf{V}, \nabla)\mathbf{V} &= -\nabla p - Q\mathbf{V}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{V}(\rho V^2/2 + \gamma p/(\gamma - 1))) = 0,$$

где N – плотность протонов, ρ – массовая плотность, V – скорость, p – давление потока солнечного ветра, γ – показатель адиабаты, а член $Q = M_i n(r)/\tau_{\text{ион}}$ описывает нагружение потока солнечного ветра ионами массой M_i , $n(r)$ – плотность нейтральных атомов в короне Марса в зависимости от расстояния от центра планеты r , $\tau_{\text{ион}}$ – время их ионизации.

В случае слабого нагружения сверхзвукового потока в линейном приближении скорость $V(r, \varphi)$ и плотность $N(r, \varphi)$ протонов солнечного ветра (φ – зенитный угол, т.е. угловое расстояние точки наблюдения от линии Марс–Солнце) изменяются вдоль орбиты спутника в соответствии с уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} V &= V_0 - \frac{(\gamma + 1)M_i n_0 r_0}{2N_0 \tau_{\text{ион}} m_p} \left(\frac{r_0}{r}\right) \frac{\varphi}{\sin \varphi} \times \\ &\times \left[1 + \frac{1}{3} \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{r_0}{r}\right)^3 \frac{\cos^3 \varphi - 3 \cos \varphi + 2}{\varphi \sin^3 \varphi} \right], \end{aligned}$$

$$N = N_0 + \frac{(\gamma - 1)M_i n_0 r_0}{2V_0 \tau_{\text{ион}} m_p} \left(\frac{r_0}{r} \right) \left[\left(\frac{2\varphi}{(\gamma - 1) \sin \varphi} + \frac{\varphi - \sin \varphi \cos \varphi}{2 \sin^3 \varphi} \right) + \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \times \left(\frac{2(\cos^3 \varphi - 3 \cos \varphi + 2)}{3(\gamma - 1) \sin^4 \varphi} + \frac{4(1 - \cos \varphi)^3}{3 \sin^6 \varphi} \right) \right], \quad (2)$$

где V_0 и N_0 – скорость и плотность невозмущенного солнечного ветра соответственно, m_p – масса протона, r_0 , n_0 и n_1 – параметры модельного профиля плотности нейтральных атомов в короне Марса [1]:

$$n(r) = n_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 + n_1 \left(\frac{r_0}{r} \right)^5, \quad (3)$$

причем $(n_0 + n_1)$ – плотность марсианской короны на расстоянии $r_0 = 10^4$ км.

Иначе уравнения (2) можно переписать в следующем виде:

$$V(r, \varphi) = V_0 - \frac{n_0 M_i r_0}{N_0 \tau_{\text{ион}}} f \left(r, \varphi, \frac{n_1}{n_0}, \gamma \right), \quad (4)$$

$$N(r, \varphi) = N_0 + \frac{n_0 M_i r_0}{V_0 \tau_{\text{ион}}} g \left(r, \varphi, \frac{n_1}{n_0}, \gamma \right).$$

Все круговые орбиты космического аппарата *Фобос-2* были примерно одинаковы, параметр

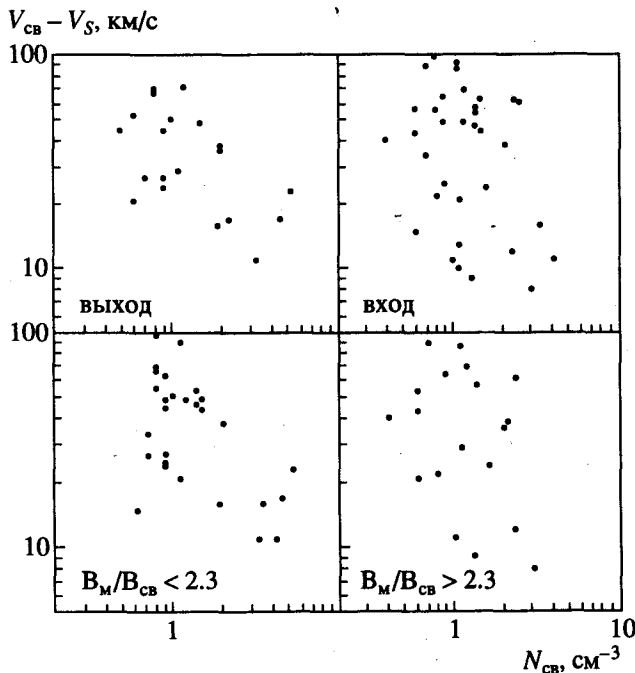


Рис. 3. Зависимость величины падения скорости $V_{\text{св}} - V_s$ от плотности солнечного ветра $N_{\text{св}}$ для четырех групп пересечений околомарсианской ударной волны.

n_1/n_0 определяется моделью короны, поэтому значения функций $f(r, \varphi, n_1/n_0, \gamma)$ приблизительно одинаковы в различных пролетах, и следовательно, можно ожидать, что величина падения скорости солнечного ветра перед околопланетной ударной волной $V_0 - V_s$ (V_s – скорость солнечного ветра непосредственно перед ударной волной) приблизительно обратно пропорциональна концентрации невозмущенного солнечного ветра в случае определяющего влияния нейтральной короны Марса.

На рис. 3 показано измеренное падение скорости солнечного ветра перед околомарсианской ударной волной в зависимости от плотности солнечного ветра $N_{\text{св}}$ отдельно для случаев входа спутника в магнитосферу планеты и выхода из нее, а также для случаев, когда отношение $B_m/B_{\text{св}} < 2.3$ и $B_m/B_{\text{св}} > 2.3$. Видно, что для случаев выхода спутника из магнитосферы и случаев небольшого скачка магнитного поля на ударной волне падение скорости действительно обратно пропорционально концентрации солнечного ветра, тогда как для случаев входа в магнитосферу и случаев значительного скачка магнитного поля зависимость довольно слабая. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что околомарсианская корона горячего кислорода или водорода существенно определяет торможение солнечного ветра перед квазипараллельной околопланетной ударной волной, тогда как при пересечении квазиперпендикулярной ударной волны эффект марсианской короны отчетливо не проявляется из-за значительного влияния отраженных протонов.

Для количественных оценок необходимо использовать более точные соотношения, учитывающие различие в координатах точек пересечения ударной волны Марса и различие между измеренными параметрами солнечного ветра $V_{\text{св}}$, $N_{\text{св}}$ и параметрами невозмущенного солнечного ветра V_0 и N_0 :

$$\begin{aligned} V_s &= V_0 - \frac{n_0 M_i r_0}{N_0 \tau_{\text{ион}}} f_s, \\ V_{\text{св}} &= V_0 - \frac{n_0 M_i r_0}{N_0 \tau_{\text{ион}}} f_{\text{св}}, \\ N_{\text{св}} &= N_0 + \frac{n_0 M_i r_0}{V_0 \tau_{\text{ион}}} g_{\text{св}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $f_s = f(r_s, \varphi_s, n_1/n_0, \gamma)$, $f_{\text{св}} = f(r_{\text{св}}, \varphi_{\text{св}}, n_1/n_0, \gamma)$, $g_{\text{св}} = g(r_{\text{св}}, \varphi_{\text{св}}, n_1/n_0, \gamma)$, индекс s относится к точке непосредственно перед ударной волной, а индекс св – к точке траектории аппарата в солнечном ветре, отстоящей по времени на ~ 50 мин от ударной волны. В линейном приближении из уравнений (5) можно получить выражение для приведенного падения скорости солнечного ветра:

$$\delta v \equiv \frac{V_{\text{св}} - V_s}{f_s - f_{\text{св}}} \frac{\tau_{\text{ион}}}{M_i r_0} \left(1 - \frac{V_{\text{св}} - V_s}{f_s - f_{\text{св}}} \frac{g_{\text{св}}}{V_{\text{св}}} \right) = \frac{n_0}{N_{\text{св}}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что величина δv должна быть обратно пропорциональна плотности солнечного ветра.

На рис. 4 показана зависимость приведенного падения скорости солнечного ветра ($n_1/n_0 = 1/3$) от плотности для тех же четырех групп пересечений космическим аппаратом околосолнечной ударной волны, что и на рис. 3. Корреляция на рис. 4 значительно улучшилась по сравнению с рис. 3, особенно для случая пересечений ударной волны с небольшим скачком магнитного поля $B_M/B_{CB} < 2.3$.

При условии, что торможение солнечного ветра перед головной ударной волной около Марса обусловлено в случае выхода спутника из магнитосферы или в случае незначительного скачка магнитного поля на ударной волне только наличием протяженной короны нейтральных частиц, можно методом наименьших квадратов оценить параметр n_0 короны: $n_0 = 500 \pm 100 \text{ см}^{-3}$ для случаев пересечения ударной волны аппаратом при выходе из магнитосферы и $n_0 = 590 \pm 10 \text{ см}^{-3}$ для случаев пересечения ударной волны с незначительным скачком магнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерения с помощью энергоспектрометра ТАУС, установленного на борту космического аппарата *Фобос-2*, показали, что перед головной ударной волной около Марса поток солнечного ветра обычно тормозится. Торможение наблюдалось в трех пролетах ударной волны в подсолнечной области, данные с которых имеются, и в большинстве пролетов ударной волны вблизи плоскости терминатора. Относительное падение скорости в 1.5–2 раза больше и более резкое перед ударной волной на вечерней стороне, чем на дневной стороне, где скорость падает более плавно (рис. 1, 2). Это различие, по-видимому, является следствием того, что на вечерней стороне обычно наблюдается квазиперпендикулярная ударная волна, а на утренней – квазипараллельная.

Как уже подчеркивалось во введении, возможны две причины торможения солнечного ветра перед ударной волной около Марса: нагружение потока солнечного ветра ионами, происходящими из нейтральной короны около планеты (1), и протонами, отраженными от ударной волны (2).

Анализ торможения солнечного ветра перед ударной волной около Марса вблизи плоскости терминатора показал, что при пересечениях ударной волны при выходе спутника из магнитосферы и пересечениях ударной волны с небольшим скачком магнитного поля величина падения скорости приблизительно обратно пропорциональна плотности солнечного ветра. Это указывает на то, что кислородная и/или водородная корона

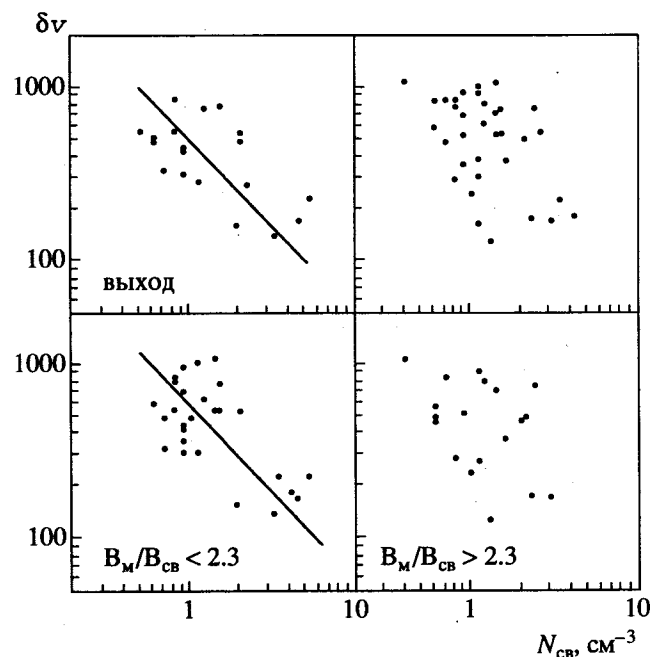


Рис. 4. Зависимость приведенного падения скорости солнечного ветра δv от плотности N_{CB} для тех же четырех групп пересечений ударной волны, что и на рис. 3. Сплошные линии соответствуют аппроксимации данных по методу наименьших квадратов: $\delta v = 500/N_{CB}$ – для пересечений ударной волны при входе аппарата в магнитосферу, $\delta v = 590/N_{CB}$ – для пересечений ударной волны со скачком магнитного поля $B_M/B_{CB} < 2.3$.

около Марса существенно определяет процесс торможения солнечного ветра в этих случаях.

Число упруго отраженных от ударной волны протонов, которые также могут быть причиной торможения солнечного ветра, зависит от различных параметров солнечного ветра: угла θ_{BN} , чисел Маха, параметра плазмы β , показателя адиабаты и др. [7]. Среди этих параметров только альвеновское число Маха M_A и β зависят от плотности солнечного ветра. Доля упруго отраженных ионов по отношению к числу падающих ионов солнечного ветра, по-видимому, возрастает с ростом M_A и β [7], и поэтому падение скорости солнечного ветра должно увеличиваться с ростом плотности солнечного ветра в случае определяющего влияния на процесс торможения упруго отраженных протонов, противоположно случаю нагружения потока ионами планетного происхождения.

Аналогично, по-видимому, невозможно объяснить полученные экспериментальные результаты с помощью “диффузных” ионов, текущих от ударной волны в области форшока перед квазипараллельной ударной волной. Действительно, величина падения скорости перед околосолнечной ударной волной (20–30 км/с, рис. 3, слева) в среднем больше, чем падение скорости солнечного ветра, наблюдаемое около Земли в форшоке

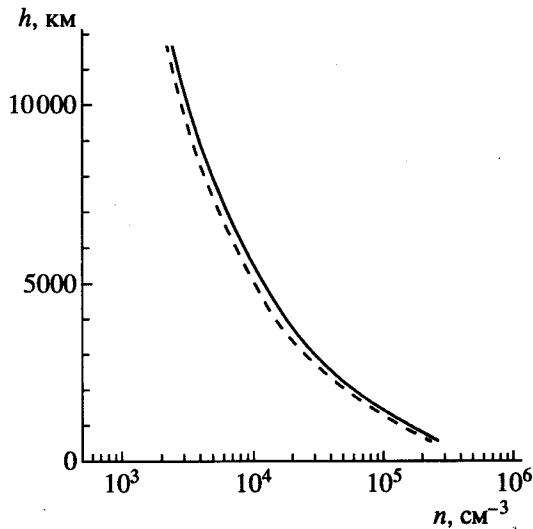


Рис. 5. Высотные профили плотности n горячего кислорода в короне Марса. Сплошная линия – профиль, рассчитанный в настоящей работе на основе анализа пересечений ударной волны вблизи плоскости терминатора. Штриховая – профиль, рассчитанный в работе [1] на основе анализа пересечений ударной волны вблизи подсолнечной точки.

(7–10 км/с, величина 25–40 км/с наблюдалась только в отдельных случаях [13]). Плотность “диффузных” ионов, текущих от ударной волны, прямо пропорциональна плотности падающего потока солнечного ветра [23], и следовательно, нагружение потока такими ионами будет приводить к падению скорости солнечного ветра перед ударной волной, не зависящему от плотности падающего потока. Это противоречит рассмотренному выше соотношению между падением скорости солнечного ветра и его плотностью в случае квазипараллельной ударной волны.

Предполагая, что торможение солнечного ветра перед квазипараллельной ударной волной в основном связано с нагружением потока ионами, происходящими из горячей кислородной короны Марса, и используя модель кислородной короны, представленную в работах [2, 3], из уравнения (6) можно оценить параметр n_0 профиля плотности (3) кислорода короны n_0 : $n_0 \sim 500\text{--}590 \text{ см}^{-3}$. На рис. 5 показан высотный профиль плотности горячего кислорода в короне Марса (сплошная линия). Этот профиль, естественно, более надежен вблизи орбиты космического аппарата *Фобос-2*, т.е. на высоте ~ 6000 км. На том же рисунке показан профиль плотности кислорода, полученный в работе [1] на основе анализа данных, полученных на эллиптических орбитах (штриховая линия, $n_0 \sim 500 \text{ см}^{-3}$, $n_1/n_0 = 1/3$), этот профиль более надежен на высоте ~ 1500 км, на которой наблюдается ударная волна вблизи подсолнечной точки. Видно хорошее согласие профилей друг с другом. Таким образом, профиль с параметрами $n_0 \sim 500 \text{ см}^{-3}$,

$n_1/n_0 = 1/3$ хорошо описывает торможение солнечного ветра перед околосолнечной ударной волной в подсолнечной области и согласуется с обнаруженной корреляцией приведенного падения скорости солнечного ветра от его плотности перед квазипараллельной ударной волной вблизи плоскости терминатора. Однако плотность горячего кислорода по этому профилю примерно в 5 раз превышает значения плотности по модели Ипа [2, 3], а с другими моделями разногласие еще больше [24–26].

Вообще говоря, рассмотренный выше профиль описывает не только кислородную корону планеты, но включает в себя также и водородную корону. Величина падения скорости перед околосолнечной ударной волной вследствие нагружения солнечного ветра ионами планетного происхождения пропорциональна массе нагружающих поток ионов и плотности короны и обратно пропорциональна времени ионизации нейтральных атомов короны (2), (4). Если зависимость плотности водорода в короне $n_H(r)$ от расстояния может быть приблизительно описана соотношением, аналогичным (3), тогда полученный профиль $n(r)$ относится к:

$$n(r) = n_O(r) + n_H(r) \frac{M_H \tau_O}{M_O \tau_H} \approx \approx 500 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right), \quad (7)$$

где M_O , τ_O и M_H , τ_H – массы и времена ионизации кислорода и водорода соответственно.

Захваченные протоны, происходящие из водородной короны Марса, наблюдались в солнечном ветре перед околосолнечной ударной волной с помощью эксперимента АСПЕРА на борту *Фобоса-2* [27]. Плотность горячего кислорода никогда не измерялась в окрестности Марса, а плотность теплового водорода оценивалась на основе данных по свечению в линии Лайман-альфа, полученных в период, близкий к минимуму солнечной активности на космических аппаратах *Martiner-6*, *7*, *9* и *Mars-2*, *3* [28, 29]. В период минимума солнечной активности плотность теплового водорода может быть в 10 раз больше плотности горячего кислорода [24–26]. Можно предположить, что то же соотношение сохранится и для периода, близкого к максимуму солнечной активности, когда проводились наблюдения на *Фобосе-2*.

Полное время ионизации можно оценить из выражения:

$$\frac{1}{\tau_{\text{ион}}} = \frac{1}{\tau_{\text{фот}}} + \frac{1}{\tau_{\text{пер}}} + \frac{1}{\tau_{\text{уд}}},$$

где $\tau_{\text{фот}}$ – время фотоионизации, $\tau_{\text{пер}}$ – время перезарядки, $\tau_{\text{уд}}$ – время ионизации электронным ударом. Вблизи орбиты Марса время ионизации атомарного кислорода $\tau_O \approx 2 \times 10^6 \text{ с}$ ($\tau_{\text{фот}} \approx 1.4 \times 10^6 \text{ с}$,

$\tau_{\text{пер}} \approx 4 \times 10^6$ с, $\tau_{\text{уд}} \approx 2 \times 10^7$ с на расстоянии 1 а. е. от Солнца), атомарного водорода $\tau_{\text{H}} \approx 3 \times 10^6$ с ($\tau_{\text{фот}} \approx 10^7$ с, $\tau_{\text{пер}} \approx 1.7 \times 10^6$ с, $\tau_{\text{уд}} \approx 5 \times 10^7$ на 1 а. е. от Солнца) [30]. С учетом разницы в массах водорода и кислорода из выражения (7) видно, что вклад водородной короны Марса в процессе торможения солнечного ветра перед ударной волной может составлять до 30% от вклада кислородной короны. Тем не менее, даже с учетом возможного вклада водородной короны, плотность кислорода в короне, определяемая по торможению солнечного ветра, в ~3.5 раза больше плотности, определяемой наиболее интенсивной моделью [2, 3].

В работе Барабаша и Норберга [31] утверждается, что гелиевая корона Марса также может оказывать влияние на процесс нагружения солнечного ветра вблизи Марса. Однако даже согласно "максимальной" инженерной модели Мороза [32] (с учетом экспоненциальной экстраполяции до высот выше 450 км) плотность водорода превышает плотность гелия начиная с высот ~1200 км. Все пересечения околomarсианской ударной волны были зарегистрированы на больших высотах (~1500 км – вблизи подсолнечной точки и ~6000 км – вблизи плоскости терминатора). Время ионизации гелия примерно на порядок величины больше времени ионизации водорода, поэтому вкладом гелиевой короны в процесс торможения солнечного ветра перед околomarсианской ударной волной можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы данные по плазме и магнитному полю, полученные в окрестности головной ударной волны около Марса вблизи плоскости терминатора на космическом аппарате *Фобос-2*. Скорость солнечного ветра уменьшается приблизительно на 7% перед ударной волной при входе спутника в магнитосферу Марса (вечерняя сторона) и на ~4% при выходе спутника из магнитосферы (утренняя сторона), причем более резкое падение скорости наблюдается на вечерней стороне. Таким же образом отличаются наблюдения, соответствующие пересечениям ударной волны со значительным скачком магнитного поля и с небольшим скачком соответственно. Это, очевидно, – следствие того, что на вечерней стороне космический аппарат чаще пересекает квазиперпендикулярную ударную волну, а на утренней – квазипараллельную.

Для пересечений ударной волны при выходе спутника из магнитосферы (квазипараллельная волна) обнаружена обратно пропорциональная зависимость между падением скорости и плотностью солнечного ветра, тогда как для пересечений ударной волны при входе спутника в магнитосферу такая зависимость слабо выражена. Такое различие позволяет разделить возможные причи-

ны торможения потока солнечного ветра перед ударной волной. Торможение солнечного ветра перед квазипараллельной ударной волной хорошо описывается нагружением солнечного ветра ионами, происходящими из нейтральной короны Марса. В случае квазиперпендикулярной ударной волны торможение солнечного ветра также связано с протонами, отраженными от ударной волны.

Обнаруженная зависимость приведенного падения скорости солнечного ветра перед ударной волной при выходе спутника из магнитосферы позволяет рассчитать профиль плотности кислородно-водородной короны Марса, который, естественно, более надежен на высоте ~6000 км, соответствующей пересечению ударной волны вблизи плоскости терминатора. Этот профиль плотности хорошо согласуется с профилем, рассчитанным ранее на основе данных о пересечениях ударной волны вблизи подсолнечной точки [1]. Однако плотность кислорода, соответствующая этому профилю в ~3.5 раза превышает плотность, рассчитанную по "максимальной" модели [2, 3].

Настоящая работа поддержана грантами № 95-02-04223 РФФИ, № MQU000/300 МНФ, № 94-982 ИНТАС, грантом ОТКА № T015866 Венгерского научного фонда и Венгерско-Российской межправительственной программой по кооперации S & T (проект № 28).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verigin M.I., Gringauz K.I., Kotova G.A. et al. On the problem of the Martian atmosphere dissipation: Phobos 2 TAUS spectrometer results // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 19, 315.
2. Ip W.-H. On a hot oxygen corona of Mars // *Icarus*. 1988. V. 76. P. 135.
3. Ip W.-H. The fast atomic corona extension of Mars // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. P. 2289.
4. Barabash S., Lundin R. Reflected ions near Mars: Phobos-2 observations // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 787.
5. Dubinin E., Obod D., Pedersen A., Grard R. Mass-loading asymmetry in the upstream region near Mars // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 2769.
6. Goodrich C.C. Numerical simulations of quasi-perpendicular collisionless shocks // *Collisionless Shocks in the Heliosphere: Reviews of Current Research*. Geophys. Monogr. Ser. V. 35 / Ed. Tsurutani B.T., Stone R.G. AGU, Washington, D.C., 1985. P. 153.
7. Wilkinson W.P., Schwartz S.J. Parametric dependence of the density of specularly reflected ions at quasi-perpendicular collisionless shocks // *Planet. Space Sci.* 1990. V. 38. P. 419.
8. Onsager T.G., Thomsen M.F. The Earth's foreshock, bow shock, and magnetosheath // *Rev. Geophys. Supplement*. U.S. National report to International Union of Geodesy and Geophysics, 1991. P. 998.
9. Sckopke N., Paschmann G., Bame S.J. et al. Evolution of ion distributions across the nearly perpendicular bow shock: Specularly and non-specularly reflected-gyrating ions // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 6121.

10. Gosling J.T., Robson A.E. Ion reflection, guration and dissipation at supercritical shocks // *Collisionless Shocks in the Heliosphere: Reviews of Current Research*. Geophys. Monogr. Ser. V. 35 / Ed. Tsurutani B.T., Stone R.G. AGU. Washington, D. C., 1985. P. 141.
11. Neugebauer M. Initial deceleration of solar wind positive ions in the Earth's bow shock // *J. Geophys.* 1970. V. 75. P. 717.
12. Gosling J.T., Thomsen M.F., Bame S.J. et al. Evidence for specularly reflected ions upstream from the quasi-parallel bow shock // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. P. 1333.
13. Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C. et al. Deceleration of the solar wind upstream from the Earth's bow shock and the origin of diffuse upstream ions // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 2981.
14. Bonifazi C., Moreno G., Lazarus A.J., Sullivan J.D. Deceleration of the solar wind in the Earth's foreshock region: ISEE 2 and IMP 8 observations // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 6031.
15. Розенбауэр Х., Шютте Н., Анати И. и др. Изучение трехмерных функций распределений основных ионов солнечного ветра: протонов и альфа-частиц в проекте "Фобос". Эксперимент ТАУС (Комплекс МПК) // *Аппаратура и методы исследования космического пространства*. М.: Наука, 1989. С. 30.
16. Aydogar O., Schwingenschuh K., Schelch G. et al. The Phobos fluxgate magnetometer (MAGMA) instrument description // IWF-8904. Austrian Academy of Sciences, 1989.
17. Rosenbauer H., Shutte N., Apathy I. et al. Ions of Martian origin and plasma sheet in the Martian magnetosphere: initial results of the TAUS experiment // *Nature*. 1989. V. 341. № 6243. P. 612.
18. Розенбауэр Х., Шютте Н., Анати И. и др. Первые результаты измерений ионов марсианского происхождения и обнаружение плазменного слоя в магнитосфере Марса по данным эксперимента ТАУС на КА "Фобос-2" // *Письма в Астрон. журн.* 1990. Т. 16. № 4. С. 368.
19. Slavin J.A., Schwingenschuh K., Riedler W., Yeroshenko Ye. The solar wind interaction with Mars: Mariner 4, Mars 2, Mars 3, Mars 5, and Phobos 2 observations of bow shock position and shape // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 11, 235.
20. Zhang T.-L., Schwingenschuh K., Lichtenegger H. et al. Interplanetary magnetic field control of the Mars bow shock: Evidence for Venuslike interaction // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 11, 265.
21. Tatrallyay M., Russell C.T., Luhmann J.G. et al. On the proper Mach number and ratio of specific heats for modelling the Venus bow shock // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 7381.
22. Biermann L., Brosowsky B., Schmidt H. The interaction of the solar wind with a comet // *Solar Phys.* 1967. V. 1. P. 254.
23. Tratner K.J., Möbius E., Scholer M. et al. Statistical analysis of diffuse ion events upstream of the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 13, 389.
24. Nagy A.F., Cravens T.E. Hot oxygen atoms in the upper atmospheres of Venus and Mars // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 433.
25. Nagy A.F., Cravens T.E. Hot hydrogen and oxygen atoms in the upper atmospheres of Venus and Mars // *Ann. Geophys.* 1990. V. 8. P. 251.
26. Lammer H., Bauer S.J. Nonthermal atmospheric escape from Mars and Titan // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1819.
27. Barabash S., Dubinin E., Pissarenko N. et al. Picked-up protons near Mars: Phobos observations // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 1805.
28. Anderson D.E. Mariner 6, 7, and 9 ultraviolet spectrometer experiment: Analysis of hydrogen Lyman alpha data // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 1513.
29. Достовалов С.Б., Чувахин С.Д. О распределении нейтрального водорода в верхней атмосфере Марса // *Космич. исслед.* 1973. Т. 11. Вып. 5. С. 767.
30. Cravens T.E., Kozyra J.U., Nagy A.F. et al. Electron impact ionization in the vicinity of comets // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 7341.
31. Barabash S., Norberg O. Indirect detection of the Martian helium corona // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 1547.
32. Мороз В.И., Кержанович В.В., Краснопольский В.А. Инженерная модель атмосферы Марса для проекта Марс-94 (МА-90) // *Космич. исслед.* 1991. Т. 29. С. 3.

Solar Wind Deceleration Upstream of the Martian Bow Shock: Possible Influence of Dense Corona of Neutral Gas

G. Kotova, M. Verigin, A. Remizov, H. Rosenbauer, K. Szego,
J. Slavin, M. Tatrallyai, K. Schwingenschuh, and N. Shutte

A deceleration of the solar wind upstream of the Martian bow shock near the terminator plane is analyzed using data of the TAUS spectrometer on board the *Phobos 2* spacecraft. The value of the velocity decrease upstream of the Martian bow shock for ascending orbit parts (on average these cases correspond to crossings of the quasi-parallel shock wave, is inversely proportional to the density of the undisturbed solar wind, but practically, there is no such dependence for descending orbit segments, which are, on average, attributed to crossings of the quasi-perpendicular shock wave. This fact can be explained by the existence of an extended corona of neutral particles near Mars that causes the solar wind deceleration upstream of the shock wave; however, in the case of crossing quasi-perpendicular shock wave, an important role is played by the strong mass loading of the solar wind by reflected protons. The obtained dependence of the velocity decrease upstream of the bow shock on the density of the undisturbed solar wind allows one to estimate the density of neutral particles in the Martian corona.