

УДК 523.165

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ МАРСА
И НА ТРАССЕ ЗЕМЛЯ — МАРС ПРИ ПОМОЩИ ЛОВУШЕК
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СОВЕТСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ 1971.— 1973 гг.

Т. К. Бреус, М. И. Веригин

IV. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОВРЕМЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКЕ «МАРС-2»

Проводится сопоставление результатов плазменных и магнитных измерений, полученных на аппарате «Марс-2» вблизи перигея орбиты 8.I 1972 г. при углах Солнце — Марс — аппарат $\sim 30-40^\circ$. Граница магнитосферы Марса в этом сеансе измерений находилась на лобовом расстоянии ≈ 1000 км от поверхности планеты. Обсуждается взаимодействие солнечного ветра с атмосферой и ионосферой Марса.

На искусственных спутниках Марса аппаратах «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5» проводились одновременные измерения характеристик плазмы и магнитного поля в области обтекания планеты солнечным ветром (см., например, [1—4]).

Сопоставление результатов одновременных измерений может дать полезную информацию о характере взаимодействия солнечного ветра с атмосферой и ионосферой Марса.

В [1] такое сопоставление проводилось по данным измерений электронной и ионной компонент плазмы и магнитного поля на спутнике «Марс-5». Из-за особенностей орбиты «Марс-5» входил в марсианскую магнитосферу (в соответствии с интерпретацией, предложенной авторами магнитных измерений [2]) при углах φ Солнце — Марс — аппарат $\geq 100^\circ$.

В [3] была сделана попытка сопоставить измерения электронной компоненты плазмы и магнитного поля при входе спутника «Марс-3» в марсианскую магнитосферу при малых углах $\varphi \sim 50-70^\circ$. Однако в сеансе измерений, рассмотренном в [3], данные плазменных измерений недостаточно детальны.

В настоящем сообщении будут рассмотрены более подробные результаты плазменных и магнитных измерений в подсолнечной области магнитосферы, проведенных 8.I 1972 г. на спутнике «Марс-2», входившем в магнитосферу Марса при углах $\varphi \sim 30-40^\circ$. Данные магнитных измерений любезно предоставлены нам Ш. Ш. Долгиновым.

Измерения электронной компоненты плазмы на спутнике «Марс-2» осуществлялись при помощи широкоугольной ($\sim \pm 40^\circ$) электронной ловушки, к управляющей сетке которой прикладывались тормозящие потенциалы $E_T \leq 400$ в. Ловушка была установлена на затененной стороне спутника и ориентирована в антисолнечном направлении. Кривая торможения электронов, состоящая из 14 отсчетов коллекторного тока электронной ловушки I_e при различных значениях E_T , измерялась в течение ~ 50 сек один раз в 2 мин. Более подробное описание использованной аппаратуры приведено в [5].

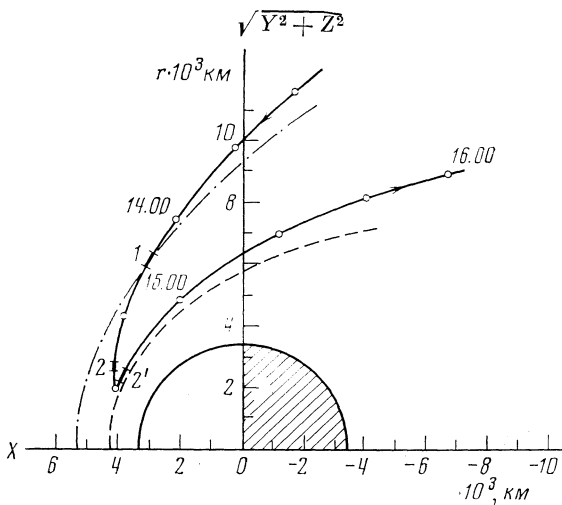


Рис. 1. Припланетный участок орбиты спутника «Марс-2» 8.I 1972 г.

Ось X направлена на Солнце и проходит через центр планеты; штрихпунктирная линия — положение фронта ударной волны; штриховая — положение магнитосферы

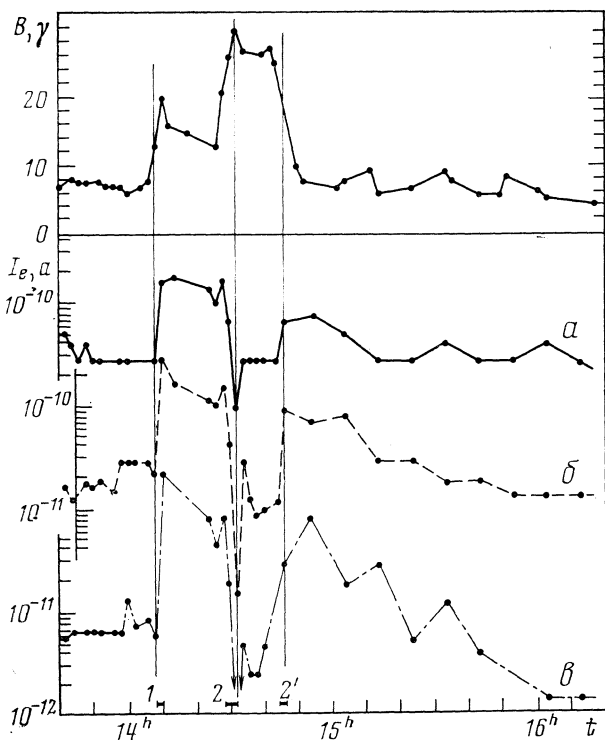


Рис. 2. Вариации токов электронной ловушки I_e при различных потенциалах торможения E_T и модуля магнитного поля в сеансе измерений 8.I 1972 г.

α — $E_T \approx 8$ в; β — $E_T \approx 20$ в; γ — $E_T \approx 50$ в

На рис. 1 показан припланетный участок орбиты спутника «Марс-2» 8.I 1972 г. Вариации I_e в анализируемом сеансе измерений при трех значениях тормозящего потенциала E_T приведены на рис. 2. На этом же рисунке вверху показаны одновременные вариации модуля магнитного поля B . Для токов приводятся непосредственные отсчеты, каждое значе-

ние V является средним из восьми измерений, сделанных на протяжении ~ 50 сек. Значение электронного тока $\sim 2,8 \cdot 10^{-11}$ а, соответствуют предельному при работе прибора на чувствительной шкале (см. [5]).

На рис. 1 и 2 жирными отрезками кривых и цифрами отмечены положения границ — фронта ударной волны 1, магнитопаузы 2 при входе «Марса-2» в магнитосферу и при выходе из нее 2', — отождествленные по характерным изменениям кривых торможения. Кривые торможения, зарегистрированные электронной ловушкой 8.I 1972 г. в невозмущенном планетой солнечном ветре, показаны на рис. 3, а, в переходной области за фронтом отошедшей ударной волны — на рис. 3, б, в марсианской магнитосфере — на рис. 3, в и снова в переходной области при выходе «Марса-2» из магнитосферы — на рис. 3, г. Сплошной линией на рис. 3 показаны кривые торможения, рассчитанные по методике, описанной в [3] при значениях электронной температуры T_e и концентрации n_e , приведенных на рисунке. При расчетах величина переносной скорости электронов V в солнечном ветре и переходной области принималась примерно равной переносной скорости ионов: в переходной области $V \sim 250$ км/сек (в соответствии с данными из [4]) в солнечном ветре величина $V \sim 450$ км/сек оценивалась с использованием газодинамических соотношений [6]. В магнитосфере Марса V принималась равной нулю. Отметим, что величина V заметным образом влияет только на оценку значений n_e , но не на T_e . [3].

Из рис. 2 и 3 видно, что пересечение фронта ударной волны — 1 в $14^{\text{h}}08^{\text{m}} - 14^{\text{h}}10^{\text{m}}$ характеризуется возрастанием I_e (при всех потенциалах торможения), T_e , n_e и V . При пересечении магнитопаузы 2 в $14^{\text{h}}28^{\text{m}} - 14^{\text{h}}32^{\text{m}}$ наблюдается падение электронных потоков при различных потенциалах торможения, уменьшается электронная температура и концентрация по сравнению с переходной областью; модуль магнитного поля B возрастает до максимальной величины $\sim 30\gamma$. На участке в $14^{\text{h}}44^{\text{m}} - 14^{\text{h}}46^{\text{m}}$ при выходе из магнитосферы наблюдалась обратная картина.

По данным измерений ионных спектров на спутнике «Марс-2», проводившихся при помощи ориентированных на Солнце электростатических анализаторов [4], в сеансе измерений 8.I 1972 г. одновременно с уменьшением электронных потоков в интервале времени от $14^{\text{h}}28^{\text{m}}$ до $14^{\text{h}}44^{\text{m}}$ наблюдалось уменьшение потоков ионов в диапазоне энергий, регистрируемых электростатическим анализатором ($27 \div 170$ эв), а также уменьшение средней энергии ионов. Причем в середине рассматриваемого интервала (ионные спектры за $14^{\text{h}}34^{\text{m}}$, $14^{\text{h}}36^{\text{m}}$, $14^{\text{h}}38^{\text{m}}$, $14^{\text{h}}40^{\text{m}}$ на рис. 7 из [4]) регистрируемые потоки ионов упали до уровня фона, в то время как потоки электронов (см. кривые торможения электронов на рис. 3, в за это же время), уменьшившись по сравнению с электронными потоками в переходной области, оставались, примерно, такими же, как в солнечном ветре (ср. рис. 3, а и 3, в).

Следует отметить, что наблюдавшаяся 8.I 1972 г. картина вариаций электронной и ионной компонент плазмы при входе в подсолнечную область марсианской магнитосферы формально напоминает картину вариаций, наблюдавшуюся на спутнике «Марс-5», несмотря на очевидное отличие областей наблюдения, а также существенное отличие приборов, измерявших характеристики ионов на обоих аппаратах. Наблюдавшуюся картину одновременной регистрации значительных электронных токов и отсутствия ионных токов можно объяснить либо существенной изотропизацией ионов, либо отворотом потока плазмы от оси прибора. Измерения на «Марсе-5» проводились в хвосте марсианской магнитосферы, где трудно предположить существенный отворот потока плазмы (примерно на $30 \div 40^\circ$, так как на «Марсе-5» был широкоугольный детектор — ионная ловушка), поэтому результаты плазменных измерений интерпретировались как вероятная квазиизотропизация потока ионов, имеющая аналогию в плазменном слое хвоста земной магнитосферы [1]. На спутнике «Марс-2», входившем в магнитосферу Марса на дневной стороне $\varphi \sim 30 \div 40^\circ$, потоки ионов

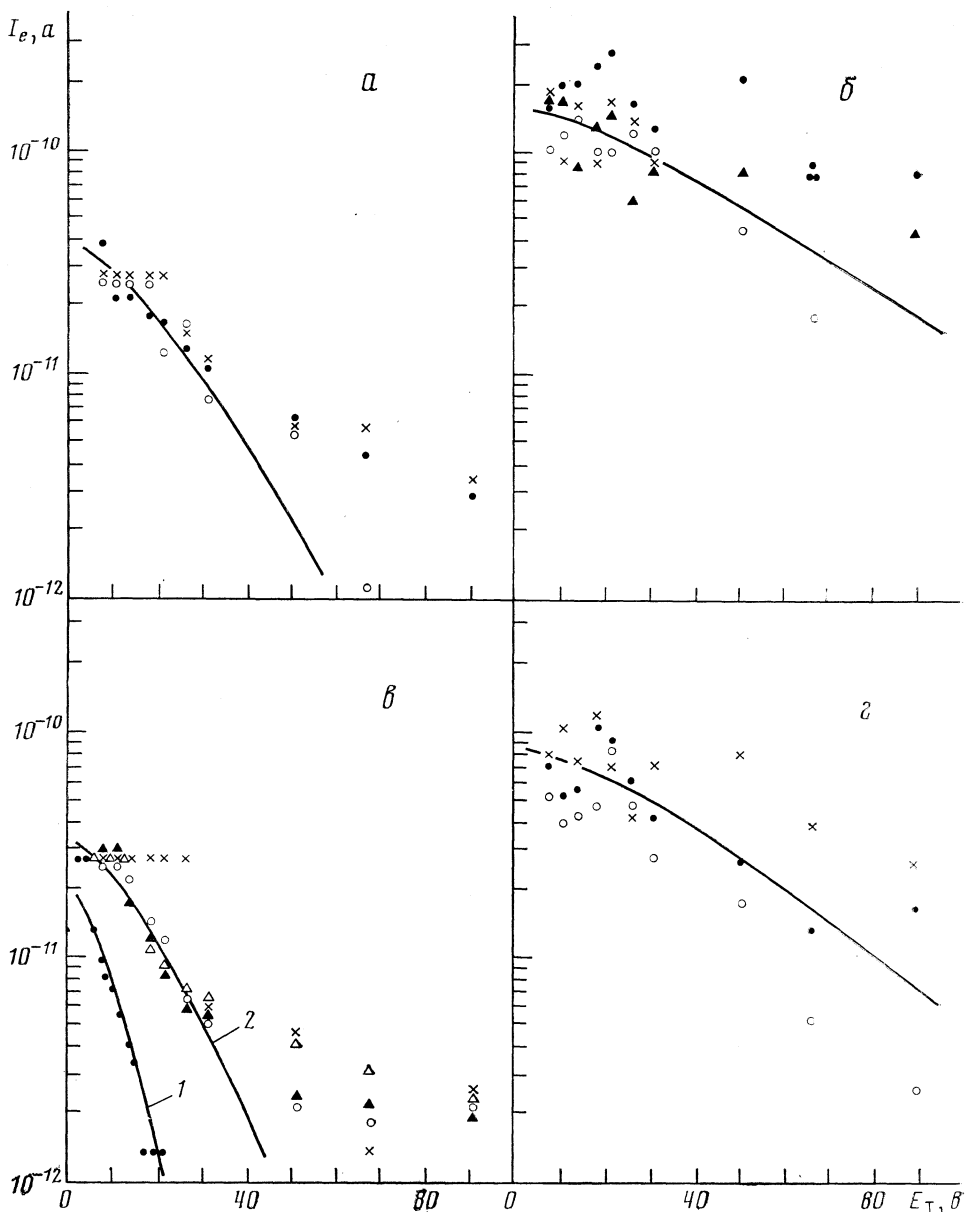


Рис. 3. Кривые торможения электронов

a — в невозмущенном солнечном ветре при $T_e \approx 1,4 \cdot 10^5$ °К и $n_e \approx 6$ см⁻³. Точки — данные, полученные в 13^h48^m, крестики — в 13^h58^m, кружки — в 14^h08^m; *б* — при входе в переходную область, при $T_e \approx 3,2 \cdot 10^5$ °К, $n_e \approx 10$ см⁻³. Точки — в 14^h10^m, крестики — в 14^h14^m, кружки — в 14^h26^m, темные треугольники — в 14^h28^m; *в* — в магнитосфере. 1 — $T_e \approx 3 \cdot 10^4$ °К, $n_e \approx 3,5$ см⁻³; 2 — $T_e \approx 10^5$ °К, $n_e \approx 4$ см⁻³. Точки — в 14^h32^m, крестики — 14^h34^m, кружки — 14^h36^m, темные треугольники — в 14^h38^m, светлые — 14^h40^m; *г* — при выходе из переходной области, где $T_e \approx 2,8 \cdot 10^5$ °К, $n_e \approx 7,5$ см⁻³. Точки — в 14^h46^m, крестики — в 14^h54^m, кружки — в 15^h04^m

регистрировались ориентированными на Солнце узкоугольными ($\mp 2^\circ$) электростатическими анализаторами [4], и в этом случае нельзя исключить, что существенное влияние на регистрировавшееся уменьшение потока и средней энергии ионов оказывало возможное отклонение (на $50 \div 60^\circ$) потока плазмы от оси прибора.

Далее оценим высоту магнитопаузы h_m и фронта отошедшей ударной волны h_Φ в подсолнечной точке в анализируемом сеансе измерений. В таблице приведены интервалы времени t (московское время), в которые наб-

людалось пересечение фронта ударной волны и магнитосферы, а также соответствующие этим интервалам времени аэоцентрические расстояния до спутника r и углы Солнце — Марс — спутник ϕ .

По пересечению фронта ударной волны I , аналогично сделанному, например в [3], были сделаны оценки h_{ϕ} и h_m с использованием газодинамических расчетов [6] в предположении, что магнитосфера Марса имеет форму, подобную форме земной магнитосферы, и что солнечный ветер характеризуется числом Маха $M_{\infty}=8$ и $\gamma=5/3$. Эти определения дали значения $h_{\phi}\sim 2000$ км и $h_m\sim 900$ км.

В таблице приведены также оценки h_m , сделанные по пересечениям марсианской магнитопаузы на участках 2 и 2' в предположении, что ее форма подобна земной. Заметим, что для этих оценок h_m не используются газодинамические модели обтекания. Кроме того, для углов $\phi\sim 30-40^\circ$, при которых аппарат входил в магнитосферу, форма препятствия в различных моделях отличается весьма незначительно и близка к сферической.

Из таблицы видно, что оценки h_m по положению фронта ударной волны близки к непосредственным оценкам h_m . В самом деле, определенные в эксперименте участки траектории, где пересекалась граница магнитосферы, лежат вблизи границы, рассчитанной по положению фронта ударной волны. Следует отметить также, что в анализируемом сеансе происходило изменение высоты магнитопаузы на ~ 500 км за время ~ 15 мин, в течение которого аппарат находился в магнитосфере. С этим изменением, очевидно, связано изменение положения фронта ударной волны, что не согласуется с выводом, сделанным в [4] об отсутствии заметных смещений фронта ударной волны за время ~ 1 сут.

Приведенные в настоящей статье результаты измерений позволяют оценить давление плазмы и магнитного поля по обе стороны от магнитопаузы.

Как отмечалось в [3] оценки n_e по данным электронной ловушки менее надежны, чем оценки T_e ; на них сказывается влияние притягивающего потенциала корпуса аппарата, переносной скорости плазмы, отличие прозрачности системы сеток электронной ловушки от оптической прозрачности; это может завязать оценку n_e в 1,5–2 раза [3].

Отметим также, что токи, регистрируемые на «Марсе-2», были несколько выше I_e , одновременно измеренных на «Марсе-3» (ср. рис. 5 и 9 из [3]), что должно привести к большим значениям $n_e\sim 6$ см⁻³, оцененным по данным «Марса-2» (см. рис. 3) по сравнению с оценками $n_e\sim 4$ см⁻³ по данным «Марса-3» (см. рис. 7 из [3]).

Поэтому при оценках давления будем пользоваться следующими значениями параметров. В солнечном ветре $n_e\approx n_i\approx 3-6$ см⁻³, $U=450$ км/сек; в магнитосфере $n_e\approx n_i\approx 2-4$ см⁻³, $T_e\approx T_i\approx 10^5$ К $B\sim 30\gamma$; $\cos^2\psi\sim 1/2$, где ψ — угол между нормалью к магнитопаузе и направлением на Солнце при входе «Марса-2» в магнитосферу. При приведенных выше значениях параметров динамическое давление солнечного ветра оказывается равным $\rho V^2 \cos^2\psi\sim (4\div 9)\cdot 10^{-9}$ дин/см², давление магнитного поля в магнитосфере $B^2/8\pi\sim 3,6\cdot 10^{-9}$ дин/см² и давление плазмы в магнитосфере $2n_e k T_e\sim (0,6\div 1,2)\cdot 10^{-10}$ дин/см². Таким образом, в пределах точности оценок магнитное поле может обеспечить баланс давлений с солнечным ветром на высоте магнитопаузы ~ 1000 км.

В то же время, столкновительные процессы на этой высоте, по-видимому, не могут обеспечить образование достаточно резкой (~ 200 км, см. таблицу) границы, так как газокINETическая длина свободного пробега на этой высоте $\lambda\sim 1/n_0\sigma\sim 10^6$ км (где $n_0\sim 10^4$ см⁻³ — концентрация нейтрального водорода на высоте 1000 км [7] и $\sigma\approx 10^{15}$ см²) и длина свободного пробега при кулоновском взаимодействии λ_k (порядка λ_k в солнечном ветре) существенно превышает характерную толщину границы.

Большая длина свободного пробега ($\lambda\sim 10^6$ км) ионов солнечного ветра на высотах ≥ 1000 км, где на «Марсе-2» наблюдалось уменьшение потоков и средней энергии регистрируемых потоков ионов [4], также не позволяет

	t	$r \cdot 10^3, \text{ км}$	Φ	$h_{\Phi}, \text{ км}$	$h_M, \text{ км}$
Фронт, вход 1	14 ^h 08 ^m –14 ^h 10 ^m	6.95–6.75	64–62°	2000	900
магнито- { выход 2	14 28 –14 32	5–4.8	37–32	2600	1500
пауза { вход 2'	14 44 –14 46	4,45–4,5	29–34	2100	1000

объяснить это явление эффективным взаимодействием с нейтральными атомами, как это предлагалось в [4]. Следует отметить, что аналогичное уменьшение потоков и средней энергии ионов наблюдалось на спутниках Земли «Прогноз» при их входе в подсолнечную область земной магнитосферы [8], и поэтому результаты плазменных измерений при пересечении «Марсом-2» марсианской магнитопаузы можно объяснить механизмами, действующими на границе земной магнитосферы.

Дата поступления
8 сентября 1975 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. I. Gringaux, V. V. Bezrukikh, M. I. Verigin et al. Measurements of electron and ion plasma components along the «Mars-5» satellite orbits. Paper presented at the 18 COSPAR Symposium, Varna, May — June 1975.
2. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Космич. исслед., 13, № 1, 108, 1975.
3. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус и др. Космич. исслед., 12, № 4, 585, 1974.
4. A. V. Bogdanov, O. L. Vaisberg. J. Geophys. Res., 80, № 4, 487, 1975.
5. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Г. И. Волков и др. Космич. исслед., 12, № 3, 430, 1974.
6. Д. Р. Спрайтер, Л. И. Алксне. В кн. Физика магнитосферы, М., «Мир», 1972, стр. 19.
7. D. E. Anderson, C. W. Hord. J. Geophys. Res., 76, 6666, 1971.
8. V. V. Bezrukikh, T. K. Breus, M. I. Verigin et al. Paper presented to the 18 COSPAR Symposium, Varna, June 1975.