

УДК 550.388:523.43

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

*Б. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин,
А. П. Ремизов*

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТ
ПЛАЗМЫ В АНТИСОЛНЕЧНОЙ ЧАСТИ ОКОЛОМАРСИАНСКОГО
ПРОСТРАНСТВА, ИЗМЕРЕННЫЕ НА СПУТНИКЕ «МАРС-5»

На космическом аппарате «Марс-5», ставшем 13.II 1974 г. спутником Марса (высота перигея ~ 1800 км, апогея $\sim 32\,000$ км, наклонение к плоскости эклиптики $\sim 60^\circ$, период обращения ~ 25 час), для измерения характеристик ионной и электронной компонент малоэнергичной плазмы были установлены широкоугольные ловушки заряженных частиц. Харак-

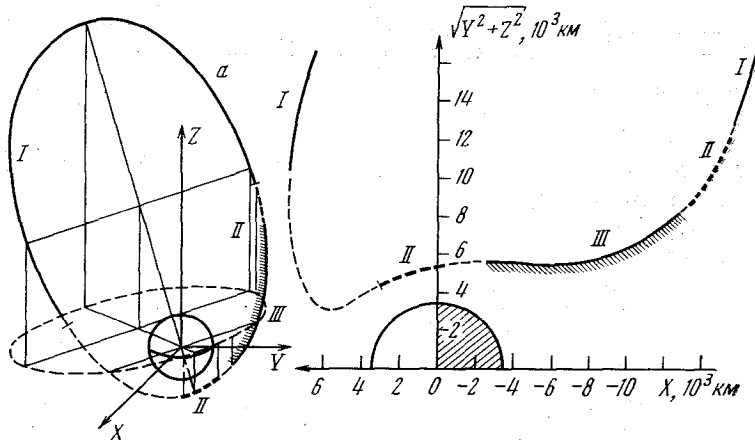


Рис. 1. Траектория аппарата «Марс-5» 14.II 1974 г.

Тонкой штриховой линией обозначены участки, где отсутствуют измерения

теристики приборов, описание их размещения на космическом аппарате и режимов измерений приведены в [1]. Ниже приводятся данные новых измерений положения границ и характеристик переходного слоя за фронтом околосолнечной отходящей ударной волны (см., например, [2—8]), а также данные первых измерений характеристик плазменного образования, расположенного за внутренней границей переходного слоя в антисолнечной части околосолнечного пространства, предварительные сведения о котором приведены в [9].

На рис. 1, *a* в солнечно-ареоэклиптических координатах приведена орбита «Марса-5» за 14.II 1974 г. Ось *X* направлена на Солнце, *Y* — лежит в плоскости орбиты Марса и образует со скоростью планеты тупой угол, ось *Z* — дополняет систему координат до правой. На рис. 1, *б* приводится участок этой же орбиты в координатах *X*, $\sqrt{Y^2+Z^2}$. Анализ ионных и электронных энергетических спектров, полученных во всех сеансах связи, показал, что вблизи планеты существуют три пересекаемых спутником зоны (I—III) с существенно различными свойствами плазмы. Типичные виды

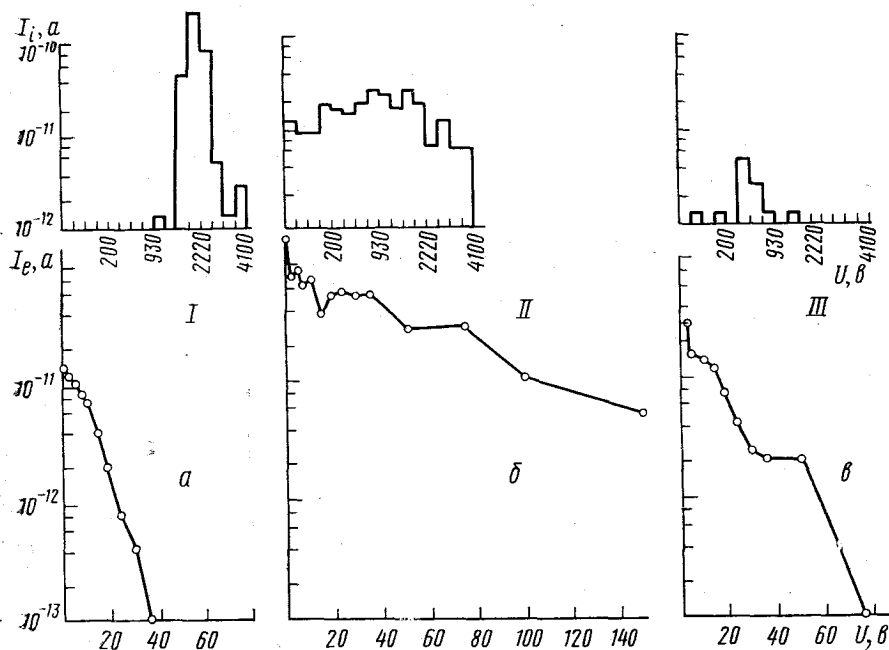


Рис. 2. Ионные спектры и кривые торможения электронов, характерные для зон I—III

первичных ионных спектров и кривых торможения электронов, соответствующих этим трем зонам, приведены на рис. 2. В зоне I ионные и электронные спектры характерны для невозмущенного планетой солнечного ветра (рис. 2, *a*). Критерием пересечения аппаратом фронта отошедшей ударной волны и входа в переходную область II является характерное изменение спектров заряженных частиц (рис. 2, *б*): ионы термализуются и их потоки возрастают; на кривых торможения электронов значительно возрастает I_{\max} — ток, соответствующий нулевому потенциалу торможения («пропорциональный $n_e \sqrt{T_e}$, где n_e — концентрация электронов, T_e — температура (см. [8])), и растет потенциал торможения, характеризующий энергию электронов.

Характеристики первых двух зон соответствуют наблюдавшимся в 1971—1972 гг. на спутниках «Марс-2» и «Марс-3», измерения на которых установили существование отошедшей ударной волны как по данным электронной [2, 3] и ионной [4, 5] компонент солнечного ветра, так и по результатам магнитных измерений [6, 7]. Характеристики плазмы в зоне III, наблюдаемой при углах Солнце — Марс — спутник более 90° , измерены впервые. Для этой зоны характерны резкое падение ионных токов по сравнению с зонами I и II (рис. 2, *в*). Уменьшение измеряемых ионных токов столь велико, что на протяжении примерно 30% участков орбиты, проходящих в зоне III, ионные потоки ниже пределов чувствительности прибора и лишь на 40% пути ионы регистрируются вполне надежно (уровень отсчета в три и более раз превышает минимальный телеметрический

отсчет). Величины электронных токов в зоне III также уменьшаются по сравнению с зоной II (рис. 2, в), однако они выше, чем в невозмущенном солнечном ветре — в зоне I (рис. 2, а) и регистрируются всегда.

Рассмотрим подробнее результаты проведенных плазменных измерений. На четырех оборотах спутника «Марс-5», данные о которых собраны в таблице, прибор не выключался при пересечении аппаратом фронта ударной волны при входе в переходную область. По приведенным ареоцентрическим расстояниям r и углам Солнце — Марс — спутник φ , между которыми аппарат пересекал фронт ударной волны, используя газодинамические расчеты [10] обтекания препятствия, имеющего форму земной магнитосферы при $M_\infty=8$, $\gamma=5/3$,

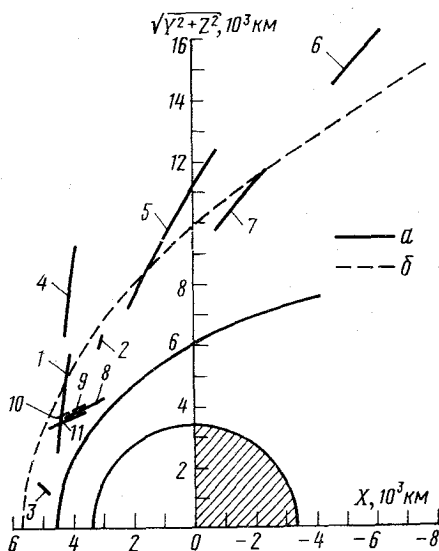


Рис. 3

Рис. 3. Пересечения спутниками Марса фронта отошедшей ударной волны

«Марс-2»: 1 — 17.ІІ 1971 г., 2 — 08.І 1972 г., 3 — 12.V 1972 г.;
 «Марс-3»: 4 — 15.XІІ 1971 г., 5 — 09.І 1972 г., 6 — 21.І 1972 г., 7 — 21.І 1972 г.;
 «Марс-5»: 8 — 13.ІІ 1974 г., 9 — 20.ІІ 1974 г., 10 — 22.ІІ 1974 г., 11 — 24.ІІ 1974 г.
 а — среднее положение препятствия, б — фронта ударной волны

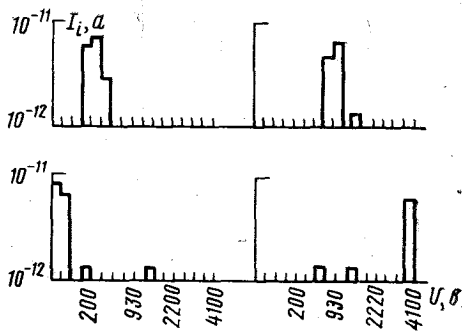


Рис. 4

Рис. 4. Примеры ионных спектров, зарегистрированных в зоне III

можно оценить высоту препятствия h_{II} (в подсолнечной точке), останавливающего солнечный ветер, аналогично тому, как это делалось в [8]. В таблице приведены также значения концентрации n , направленной скорости V и динамического давления ρV^2 протонов солнечного ветра перед пересечением фронта ударной волны (в сеансах с двухминутными интервалами между последовательно полученными электронными и ион-

Дата, 1974 г.	Время, час, мин.	r , 10^3 км	φ°	n , см $^{-3}$	V , км·сек $^{-1}$	h_{II} , км	ρV^2 , 10^{-8} дн·см $^{-2}$
13.ІІ	19.17—19.27	5,6—5,2	40—55	9	455	750—400	3,1
20.ІІ	00.19—00.21	5,5—5,4	44—48	11	480	650—450	4,2
22.ІІ	01.53—01.55	5,8—5,65	39—42	1,8	640	900—800	1,2
24.ІІ	03.37—03.47	5,85—5,3	35—47	2,5	620	1050—400	1,6

ными спектрами приведены усредненные по десятиминутному интервалу значения). Концентрации и скорости ионов H^+ солнечного ветра оценивались по трем наиболее близким к максимальному отсчетам в предположении максвелловского распределения в системе координат, движущейся со скоростью V . Температура протонов в рассматриваемые моменты времени лежала в пределах $(80 \div 200) \cdot 10^3$ °К, а T_e в пределах $(70 \div 230) \cdot 10^3$ °К. При входе в переходную область концентрация заряженных час-

тиц (оцененная по данным электронной ловушки) возростала в 1,5—3 раза, температура электронов достигала $(0,3 \div 1) \cdot 10^6$ °К.

Сравнивая значения высоты препятствия в лобовой точке (таблица) с динамическим давлением солнечного ветра в двухминутных сеансах измерений 20 и 22.II, можно видеть, что высота препятствия с увеличением ρV^2 уменьшается. 13 и 24.II большой разброс оценок h_n связан с редкой опросностью приборов (электронный и ионный спектры измерялись за ~ 1 мин с интервалом в ~ 9 мин), но так как динамическое давление солнечного ветра в этих сеансах было меньшим, чем 20.II (см. таблицу), то высота препятствия в них, по-видимому, была не меньше (хотя и в указанных в таблице пределах), чем в последнем сеансе. Поэтому за минимальную оценку высоты препятствия по данным «Марса-5» можно принять оценку $h_n \sim 500$ км, сделанную по пересечению фронта ударной волны 20.II 1974 г. Заметим, что по данным спутников «Марс-2» и «Марс-3» минимальная оценка высоты препятствия $h_n \sim 600$ км (по пересечению аппаратом «Марс-2» фронта ударной волны 12.V 1972 г.) близка в полученной выше. Следует отметить, что оценка высоты препятствия $h_n \sim 500$ км получена при концентрации ионов солнечного ветра $n \sim 11$ см⁻³ и скорости $V \sim 480$ км·сек⁻¹, что существенно превышает среднее значение n и несколько выше среднего значения V даже у орбиты Земли.

Оценим средние значения размеров препятствия по всем зарегистрированным на «Марсе-2», «Марсе-3» и «Марсе-5» пересечениям фронта ударной волны аналогично тому, как это было сделано в [8]. На рис. 3 показаны участки орбит спутников Марса, на которых они пересекали фронт ударной волны. Характеристики плазмы, полученные в ближайших к планете точках, изображенных на этом рисунке участков орбит, характерны для переходной области за фронтом ударной волны (рис. 2, б), а в наиболее удаленных точках этих участков — для невозмущенного планетой солнечного ветра (рис. 2, а). Ареоцентрические расстояния до подсолнечной точки препятствия и фронта ударной волны (выбранные как и в [8] так, чтобы сумма квадратов расстояний от обоих концов участков орбит, на которых спутники пересекали фронт ударной волны до фронта, была бы минимальной) составляют соответственно $(4,6 \pm 0,8) \cdot 10^3$ и $(5,7 \pm 1) \cdot 10^3$ км, т. е. по всем пересечениям фронта ударной волны оценка средней высоты $h_n \sim 1200 \pm 800$ км.

Остановимся подробнее на физических характеристиках зоны III, данные о которых получены впервые. Из рис. 1, б видно, что участок орбиты, пересекавший 14.II 1974 г. зону III, соответствовал величинам $\sqrt{Y^2 + Z^2}$ от ~ 5800 до ~ 8000 км, т. е. интервалу расстояний от линии Солнце — Марс, превышавшему 2000 км; вдоль оси X его протяженность не менее нескольких радиусов Марса.

Выше отмечалось, что зарегистрированные ионные токи в этой зоне существенно меньше, чем в невозмущенном солнечном ветре, а электронные — выше. При этом энергии ионов значительно более изменчивы (как правило, ниже, но иногда и выше, чем в зоне I — см. рис. 4). По кривым торможения, зарегистрированным электронной ловушкой, в зоне III можно оценить температуру электронов и концентрацию заряженных частиц в этой области. Характерные температуры электронов составляют $T_e \sim 100 \cdot 10^3$ °К, однако наблюдались значения T_e в пределах $(70 \div 250) \cdot 10^3$ °К. Заметим, что возможная переносная скорость электронов (меньшая, чем в солнечном ветре) слабо влияет на точность определения T_e [8]. Оценки n_e , согласно [8], дают величины $\sim 2 \div 8$ см⁻³, т. е. примерно такие же, как и в солнечном ветре.

В этих условиях резкое уменьшение ионных токов в модуляционной ловушке по сравнению с солнечным ветром (ср. рис. 1, а с рис. 1, в и 4) может произойти в двух случаях: либо направленный поток ионов меняет свое направление и притом весьма значительно, ибо ионная ловушка широкоугольна — см. [1], либо он становится квазиизотропным. Заме-

тим, что изменение направления движения плазмы или ее изотропизация должны заметно сказаться только на регистрируемых ионных токах, а не на электронных, так как поток электронов квазиизотропен даже в невозмущенном солнечном ветре. Изотропизация же ионного потока должна уменьшать регистрируемый ловушкой ионный ток примерно в 20 раз по сравнению с холодным ионным потоком, нормальным к апертуре ловушки (см. характеристики прибора в [1]). Увеличение средней энергии \bar{E} окружающих спутник протонов до значений, выходящих за пределы энергий, регистрируемых прибором ($\bar{E} \leq 4000$ эв), маловероятно, так как при всех изменениях ионных спектров в зоне III (в тех случаях, когда они регистрируются) максимальные отсчеты лежат в основном при энергиях $\sim 200 \div 500$ эв.

Сопоставление результатов обсуждаемых плазменных измерений с данными одновременно проведенных на «Марсе-5» магнитных измерений [11] показало, что

- 1) магнитные данные также свидетельствуют о наличии трех различных зон вдоль близкого к планете участка орбиты спутника;
- 2) зарегистрированные границы между зонами по данным тех и других измерений совпадают при всех оборотах спутника вокруг планеты;
- 3) для зоны III характерны существенное уменьшение флуктуаций магнитного поля (весьма значительных в зоне II) и значительный рост величины регулярного магнитного поля. Это дало основания авторам [11] отнести зону III к хвосту марсианской магнитосферы.

Возможны два предположения о природе плазменной зоны III. Она может относиться либо к «плазменному слою», аналогичному существующему в центральной части хвоста земной магнитосферы (см., например, [12 и 13]), либо к пограничному слою между переходным слоем за фронтом ударной волны и магнитосферой Марса, подобному слою, обнаруженному в хвосте земной магнитосферы [13, 14].

Если это пограничный слой, то направление движения плазмы в нем должно быть в основном антисолнечным [13, 14], хотя в пограничном слое в земной магнитосфере наблюдались отклонения направленной скорости ионов от антисолнечного направления на углы $\sim \pm 20^\circ$ [15]. Несмотря на то что по изменчивым ионным спектрам в зоне III видно некоторое уменьшение средней скорости ионов, для объяснения наблюдаемого уменьшения ионных токов в этом случае необходимо допустить либо значительное уменьшение концентрации плазмы в зоне III по сравнению с невозмущенным солнечным ветром (однако если бы это имело место, то было бы невозможно объяснить, почему в зоне III регистрируются электронные токи, большие, чем в зоне I), либо весьма значительный (на $30-40^\circ$) поворот направленной скорости потока плазмы на границе между зонами II и III. Объяснить такой поворот потока плазмы также весьма трудно.

Если же зона III — это плазменный слой в хвосте марсианской магнитосферы, то регистрацию малых ионных токов можно объяснить высокой степенью изотропности ионов в этой зоне, имеющей аналогию в плазменном слое хвоста земной магнитосферы; при этом противоречие между одновременной регистрацией малых ионов и больших электронных токов снимается. В земной магнитосфере энергии изотропных ионов плазменного слоя $\bar{E} > E_0$, где E_0 — энергия ионов в невозмущенном солнечном ветре ($\bar{E} \sim 6$ кэв — см. [14]) в описываемой здесь зоне III $\bar{E} < E_0$. Это отличие от земной магнитосферы может быть связано с тем, что магнитное поле Марса относительно мало и неспособно обеспечить ускорение ионов.

Совокупность плазменных данных, относящихся к зоне III, и магнитных измерений в этой зоне (рост регулярной компоненты и падение флуктуаций магнитного поля с одновременным уменьшением концентрации плазмы по сравнению с переходным слоем — зоной II) свидетельствует в пользу магнитной природы препятствия, обтекание которого солнечным

ветром образует околосолнечную отходящую ударную волну. Однако при отсутствии данных о магнитном поле на малых высотах и на поверхности планеты решающие доказательства того, что обсуждаемое магнитное поле является собственным магнитным полем Марса, может, по нашему мнению, дать лишь совместное изучение одновременных данных о вариациях магнитных полей в межпланетном пространстве и вблизи планеты (см. [16]).

Дата поступления
20 июля 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Космич. исслед., 12, № 3, 430, 1974.
2. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh et al. Icarus, 18, 54, 1973.
3. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh et al. J. Geophys. Res., 78, 5802, 1973.
4. O. L. Vaisberg, A. V. Bogdanov et al. Icarus, 18, 59, 1973.
5. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов. Космич. исслед., 12, № 2, 279, 1974.
6. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Докл. АН СССР, 207, 6, 1973.
7. Sh. Sh. Dolginov, Ye. G. Yeroshenko, L. N. Zhuzgov. J. Geophys. Res., 78, 4779, 1973.
8. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Космич. исслед., 12, № 4, 585, 1974.
9. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Докл. АН СССР, 218, № 4, 1974.
10. Дж. Р. Спрайгер, А. И. Алксне. В кн. «Физика магнитосферы», М., «Мир», 1972, стр. 19.
11. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко и др. Докл. АН СССР, 218, № 4, 1974.
12. K. I. Gringauz. Rev. Geophys., 1—2, 339, 1969.
13. E. W. Hones, Jr., J. R. Asbrige et al. J. Geophys. Res., 77, 5503, 1972.
14. S. I. Akasofu, E. W. Hones, Jr., et al. J. Geophys. Res., 78, 7257, 1973.
15. D. S. Intrilligator, J. H. Wolfe. J. Geophys. Res., 77, 5480, 1972.
16. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко и др. Космич. исслед., 13, № 1, 108, 1975.