

УДК 520.6; 523.4

© 1990 г.

Х. РОЗЕНБАУЭР, Н. ШЮТТЕ, И. АПАТИ, М. ВЕРИГИН,
М. ВИТТЕ, А. ГАЛЕЕВ, К. ГРИНГАУЗ, Х. ГРУНВАЛЬДТ,
К. ЙОКАС, П. КИРАЙ, Г. КОТОВА, С. ЛИВИ,
Е. МАРШ, А. РЕМИЗОВ, А. РИХТЕР, В. РИДЛЕР,
К. СЕГЕ, П. ХЕММЕРИХ, Р. ШВЕНН,
К. ШВИНГЕНШУ и М. ШТЕЛЛЕР

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНОВ МАРСИАНСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ В МАГНИТОСФЕРЕ МАРСА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ТАУС НА КА «ФОБОС-2»

На космическом аппарате «Фобос-2» с помощью прибора ТАУС измерялись детальные энергетические и угловые спектры ионов, приходящих в пределах телесного угла $40 \times 40^\circ$ в направлении от Солнца. Эти измерения, подтвердившие ранее полученные результаты на спутниках «Марс-2», -3 и -5» (см., например, Грингауз и др., 1976; Грингауз, 1976, 1981; Долгинов и др., 1976), вместе с тем явились первыми плазменными измерениями глубоко в оптической тени планеты; масс-спектрометрия ионов в околомарсианском пространстве ранее вообще не проводилась. В результате этих измерений было обнаружено, что марсианская магнитосфера в значительной степени заполнена потоками тяжелых ионов, происходящих из атмосферы планеты, и обнаружен плазменный слой в ареомагнитном хвосте, также в основном состоящий из тяжелых ионов. Поток планетных ионов, покидающих Марс через ареомагнитный хвост, по предварительным оценкам составляет $(0.5-2) \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}$.

EVIDENCES OF THE PLASMASHEET IN MARTIAN MAGNETOTAIL BASED IN TAUS EXPERIMENT DATA ON BOARD «PHOBOS-2» SPACECRAFT, by H. Rosenbauer, N. Shutte, I. Apathy, M. Verigin, M. Witte, A. Galeev, K. Gringauz, H. Grunwaldt, K. Jokas, P. Kiraly, G. Kotova, S. Livi, E. Marsch, A. Remizov, A. Richter, W. Riedler, K. Szego, P. Hemmerich, R. Schwen, K. Schwingenschuh and M. Steller. Detailed energetic and angular spectra of ions, coming from an angular range of $40^\circ \times 40^\circ$ in sunward direction were measured by TAUS instrument onboard the «Phobos-2» spacecraft. These measurements confirmed the previous results obtained onboard «Mars-2», «Mars-3» and «Mars-5» (e.g. Gringauz et al., 1976, Gringauz, 1976, 1981; Dolginov et al., 1976) but also are the first plasma measurements deep in optical shadow of the planet; previously mass-spectrometers were not used in the near-martian space also. These measurements revealed the martian magnetosphere to be filled considerably with fluxes of heavy ions, originated from planetary atmosphere. In the areomagnetic tail plasmashet was found also mainly consisting of heavy ions. The flux of heavy ions leaving the Mars through the areomagnetic tail is evaluated tentatively to be $(0.5-2) \cdot 10^{25} \text{ s}^{-1}$.

Анализ ионов по энергиям E_i ($i = 1, 32$) в эксперименте ТАУС осуществлялся при помощи полусферического электростатического

анализатора с энергетическим разрешением $\delta E_i/E_i \approx 0.055$ в диапазоне энергий/заряд $30 \text{ эВ}/q \leq E_i/q \leq 6 \text{ кэВ}/q$. Через установленный за ним аналогичный электростатический анализатор, находящийся под переменным ускоряющим напряжением U_a , все ионы пролетали уже с фиксированной энергией $E_i + qU_a \approx 6 \text{ кэВ}$. Разделение протонов, α -частиц и более тяжелых ионов ($m_i/q \geq 3$) осуществлялось магнитной системой, расположенной в средней части этого анализатора.

При фиксированном значении E_i в эксперименте ТАУС одновременно отдельными КЭУ проводились измерения потока протонов (или α -частиц) в восьми азимутальных направлениях ϕ_j ($j = 1, 8$) при трехосной ориентации КА и потока тяжелых ионов, приходящих в диапазоне $\varphi \approx \pm 20^\circ$. Сканирование по углам θ_k ($k = 1, 8$) осуществлялось при помощи электростатического дефлектора, расположенного перед первым анализатором. В большинстве режимов работы время накопления ионов составляло ≈ 24 мс. Трехмерный (E_i, φ, θ_k) спектр протонов и α -частиц, состоящий из 2048 измерений, и двумерный (E_i, φ_j) спектр тяжелых ионов измерялись за 8 с.

В связи с ограниченностью выделенного объема телеметрической информации при помощи имевшегося в приборе ТАУС микропроцессора проводилось ее сжатие. Суммированием по (j, k) , (i, k) или (i, j) многомерные спектры ионов сводились к одномерным энергетическим ($i = 1, 32$) и угловым ($j, k = 1, 8$) спектрам. Кроме того, по трехмерным спектрам ионов вычислялись их нулевой (концентрация), первые (вектор скорости) и вторые (шесть компонентов тензора давлений) моменты. Соотношение между количеством передаваемых трехмерных, двумерных, одномерных спектров и их моментов изменялось в зависимости от режима работы телеметрической системы КА (быстрый ≈ 200 бит/с, медленный ≈ 10 бит/с на ТАУС) и от выбранного режима работы прибора. Более подробно эксперимент ТАУС описан в работе Розенбауэра и др. (1989).

На рис. 1, а приведены усредненные за 4 мин энергетические спектры протонов, измеренные в эксперименте ТАУС 1-2 февраля 1989 г. при первом пролете в окрестности Марса КА «Фобос-2» по вытянутой эллиптической орбите. Траектория КА в этот период времени показана на рис. 2 в ареосолнечной эллиптической цилиндрической системе координат (АСЭ) с учетом аберрации направления прихода солнечного ветра вследствие орбитального движения планеты.

Характерной особенностью спектров, приведенных на рис. 1, а, является значительное уменьшение средней энергии и расширение энергетических спектров протонов в ≈ 18.25 UT. Последнее связано с падением их переносной скорости и термализацией на околомарсианской ударной волне. Следует отметить, что некоторое падение переносной скорости и термализация протонов начались еще за ≈ 15 мин до пересечения «Фобосом-2» ударной волны (рис. 1, а) при прохождении КА области предвестников волны (ПВ), образованной, вероятно, как и у околоземной ударной волны, протонами солнечного ветра, отраженными от ударного фронта.

После пересечения ударной волны вплоть до пересечения магни-

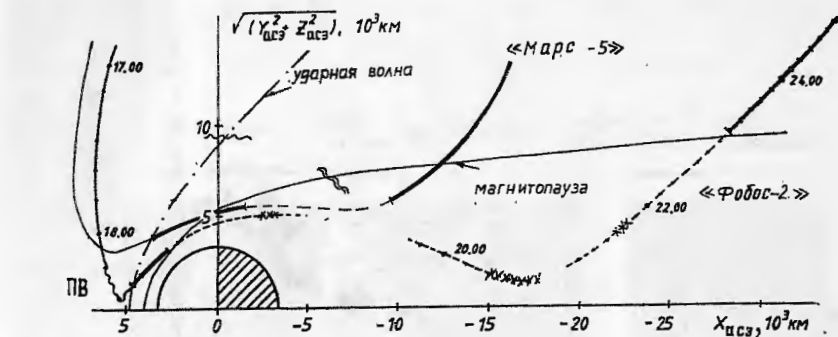
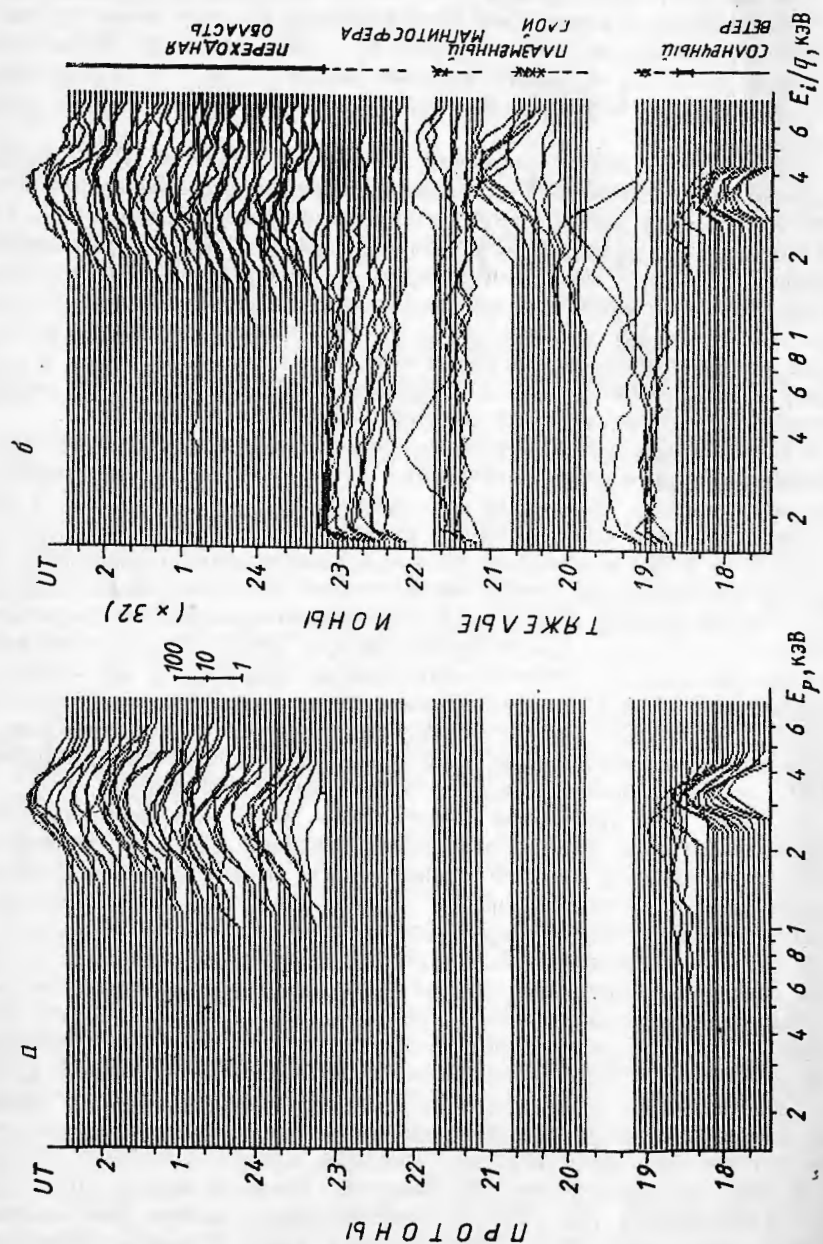


Рис. 2. Первая эллиптическая орбита спутника «Фобос-2» в солнечно-эклиптической цилиндрической системе координат 1 февраля 1989 г.

топаузы в ≈ 18.37 UT энергоспектрометром ТАУС регистрировались широкие флуктуирующие спектры турбулизованных потоков протонов в переходной области. Эта область отмечена на траектории КА (рис. 2) и в правой части рис. 1 толстой сплошной линией. При пересечении магнитопаузы потоки протонов по данным прибора ТАУС упали ниже предела чувствительности этого эксперимента (рис. 1, а) и оставались на таком уровне всюду в марсианской магнитосфере вплоть до выхода «Фобоса-2» из нее ≈ 23.10 UT. После этого опять стали регистрироваться широкие турбулизованные спектры протонов переходной области.

Описанные выше характерные изменения спектров протонов в различных частях околомарсианского пространства ранее наблюдались, например, на КА «Марс-5» (Грингауз, 1976). Положения ударной волны по данным «Фобоса-2» и по данным предыдущих марсианских экспериментов на КА «Марс-2, -3 и -5» (см., например, Грингауз и др., 1976; Грингауз, 1976, 1981; Долгинов и др. 1976) также весьма близки. Предварительное сравнение положений ударной волны и магнитопаузы, определенных по данным эксперимента ТАУС, спектрометра электронов ХАРП (Шютте и др., 1989) и магнитометров МГМА и ФГММ во всех случаях показало их разумное согласие.

Всего за время активной работы КА «Фобос-2» на околомарсианских орбитах плазменные измерения с помощью спектрометра ТАУС были проведены на четырех эллиптических орбитах с перигеем высотой ≈ 850 км, на одной переходной эллиптической орбите с перигеем, равным высоте орбиты спутника Марса Фобос, и на

Рис. 1. Энергетические спектры протонов (а) и тяжелых ионов (б), измеренные 1–2 февраля 1989 г., усредненные за 4 мин. Сплошной линией справа отмечены участки траектории спутника в невозмущенном солнечном ветре, жирной линией — в переходной области, пунктирной — в магнитосфере Марса. Крестиками обозначены места наблюдения потоков тяжелых ионов внутри магнитосферы

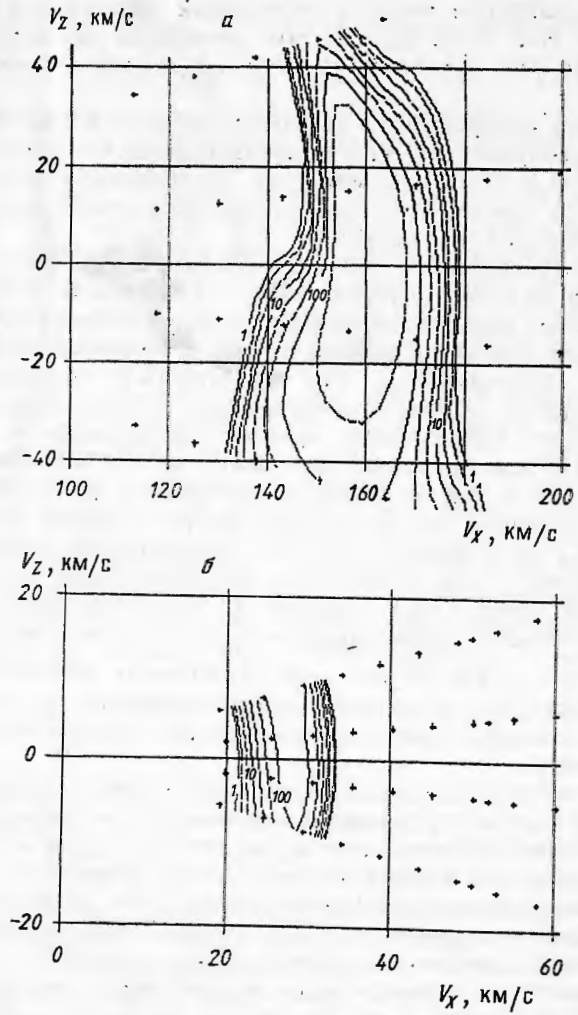
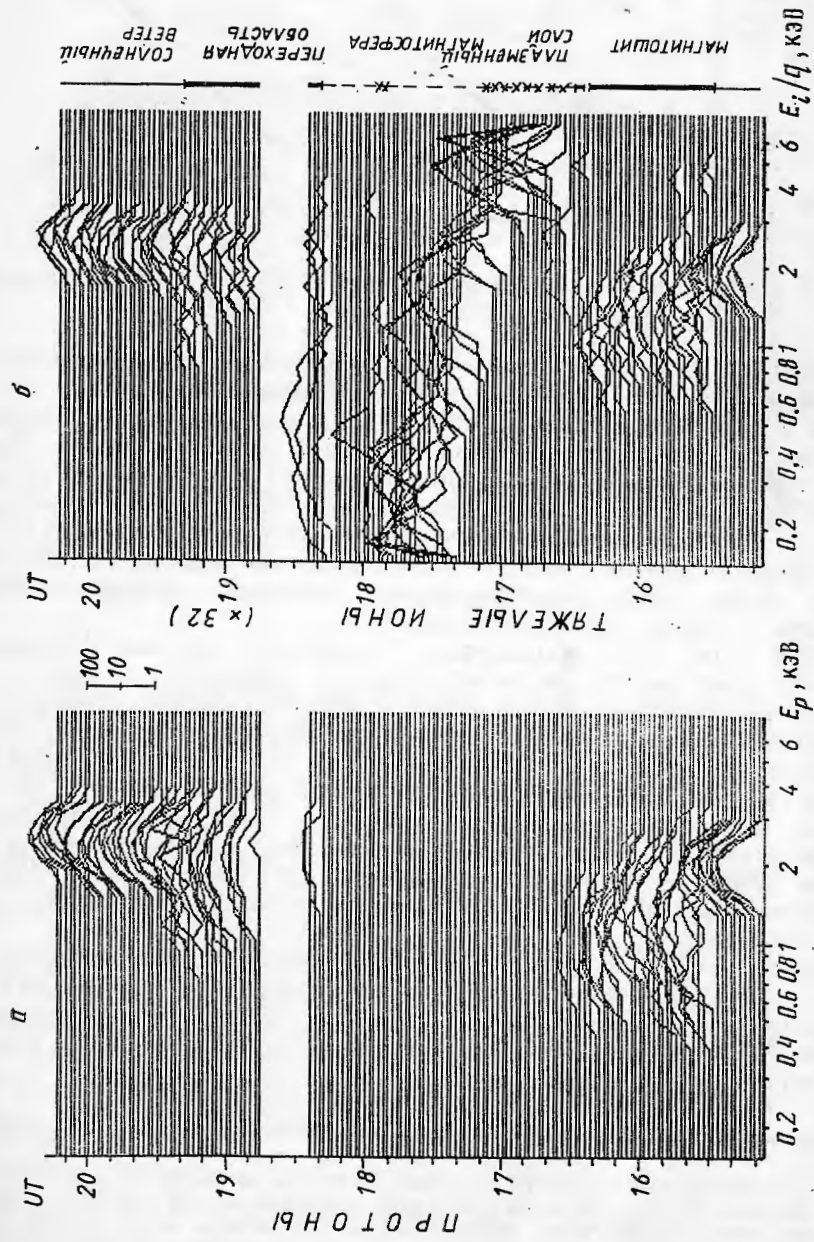


Рис. 4. Двумерные спектры тяжелых ионов, зарегистрированных в хвосте магнитосферы Марса 5 февраля 1989 г. (01.55 UT) — а и 11 февраля 1989 г. (13.03 UT) — б. Представлены изолинии отсчетов КЭУ в канале тяжелых ионов в плоскости (V_x, V_z) в предположении, что зарегистрированные ионы являются ионами O^+ . Крестиками обозначены центры областей измерения потоков частиц

≈ 60 круговых орбитах, близких к орбите Фобоса. В качестве примера на рис. 3, а показаны энергетические спектры протонов, измеренные вдоль одной из круговых орбит 2 марта 1989 г. Характерные вариации протонных спектров вдоль таких орбит также весьма надежно позволяют определить интервалы времени, когда «Фобос-2»

Рис. 3. Энергетические спектры протонов (а) и тяжелых ионов (б), полученные на круговой орбите 2 марта 1989 г. Обозначения те же, что и на рис. 1

находился в солнечном ветре, в переходной области или в магнитосфере Марса. Как и на рис. 1, эти интервалы времени отмечены в правой части рис. 3 тонкой, толстой и пунктирной линиями соответственно.

Плазменные измерения на круговых орбитах позволяют сделать вывод, что магнитопауза в хвосте магнитосферы во время измерений на КА «Фобос-2» была, по-видимому, расположена дальше от оси ареомагнитного хвоста, и, следовательно, этот хвост был толще, чем во время измерений на «Марсе-3».

Для иллюстрации этого предварительного заключения на рис. 2 показана одна из орбит спутника «Марс-5». Как и на орбите «Фобоса-2», пунктиром выделен период нахождения «Марса-5» в магнитосфере. Двойной волнистой линией на рис. 2 показана область околомарсианского пространства, где наблюдалась магнитопауза на $\approx 30\%$ имеющихся и проанализированных к настоящему времени круговых орбит. Характерная толщина ареомагнитного хвоста на $X_{АСЭ} \approx -7 \cdot 10^3$ км во время измерений на КА «Фобос-2» составляла $\approx 4R_M$, тогда как во время измерений на «Марсе-5» в 1974 г. характерная толщина хвоста на этих же расстояниях от Марса составляла $\approx 3.2 R_M$ (Грингауз, 1984). С удалением от планеты на ареомагнитного хвоста еще более возрастает (рис. 2); на второй эллиптической орбите при выходе из магнитосферы ($X_{АСЭ} \approx 30 \cdot 10^3$ км) пересечения ареомагнитного хвоста наблюдались вплоть до $\sqrt{Y_{АСЭ}^2 + Z_{АСЭ}^2} \approx 13.6 \cdot 10^3$ км, что формально соответствует толщине хвоста $\approx 8 R_M$. Однако на таких удалениях от планеты следует уже учитывать возможное отклонение направления прихода солнечного ветра.

Наиболее интересным результатом плазменных измерений на КА «Фобос-2» явилось обнаружение в марсианской магнитосфере значительных потоков тяжелых ионов планетного происхождения. На рис. 1, б и рис. 3, б приведены результаты измерения энергетических спектров в канале, предназначенном для регистрации тяжелых ионов. Следует отметить, что в этот канал попадает также незначительная часть протонов солнечного ветра, однако их легко выделить при сравнении с одновременно измеренными протонными спектрами (рис. 1, а, и рис. 3, а). При таком сравнении следует учитывать, что спектрам на рис. 1, б и рис. 3, б, одинаковым по высоте со спектрами на рис. 1, а и рис. 3, а, соответствуют в 32 раза меньшие потоки ионов.

Как можно видеть из приведенных на рис. 1, б данных, потоки тяжелых ионов с энергиями ≤ 1 кэВ 1 февраля 1989 г. стали регистрироваться спектрометром ТАУС сразу же после входа КА «Фобос-2» в магнитосферу Марса. Однако самые большие потоки тяжелых ионов с наибольшими энергиями $E_i \approx 4$ кэВ были отмечены в 20.20 — 20.40 UT в окрестности наибольшего углубления КА в ареомагнитный хвост (рис. 2). Перед выходом «Фобоса-2» из магнитосферы энергия регистрируемых ТАУСом тяжелых ионов опять не превышала ≈ 1 кэВ; их потоки уменьшились и упали ниже порога чувстви-

тельности прибора сразу же после пересечения магнитопаузы в ≈ 23.10 UT.

На других эллиптических и круговых орбитах также наблюдалось неоднородное распределение интенсивности и энергии потоков тяжелых ионов в ареомагнитном хвосте, изменяющееся от орбиты к орбите. Область с наиболее энергетичными тяжелыми ионами при этом не всегда была расположена в глубине ареомагнитного хвоста и не всюду в магнитосфере Марса потоки тяжелых ионов регистрировались вообще. Пример таких измерений показан на рис. 3, б. На этом витке КА вошел в область с наибольшими потоками энергетичных тяжелых ионов $E_i \geq 3$ кэВ вскоре после пересечения магнитопаузы. При дальнейшем движении по орбите энергия ионов уменьшалась и в интервале времени ≈ 18.00 — 18.20 UT тяжелые ионы не регистрировались совсем. Как и на первом витке, перед выходом КА из магнитосферы были зафиксированы тяжелые ионы с энергиями ≤ 1 кэВ.

Представляется достаточно очевидным, что тяжелые ионы, зарегистрированные ТАУСом в магнитосфере Марса, являются ионами планетного происхождения. Имеющаяся информация о составе верхней атмосферы Марса (см., например, Нэги и Кравенс, 1988; Ип, 1988) дает основание полагать, что это в основном ионы O^+ , что согласуется и с данными масс-спектрометрических измерений в марсианской магнитосфере, проведенных в эксперименте АСПЕРА.

Предварительное сопоставление результатов измерений в эксперименте ТАУС потоков тяжелых ионов в марсианской магнитосфере с одновременными измерениями магнитного поля показало, что наибольшие потоки таких ионов (как правило, с наибольшими энергиями) наблюдаются в окрестности изменения знака B_x -компоненты магнитного поля — нейтрального слоя. Эти интервалы времени отмечены крестиками на рис. 1—3. Область с увеличенной концентрацией плазмы, расположенную в геомагнитном хвосте по обе стороны нейтрального слоя, принято называть плазменным слоем. Образование с аналогичными свойствами в ареомагнитном хвосте разумно также назвать плазменным слоем.

В чем же различие геомагнитного и ареомагнитного плазменных слоев? В геомагнитосфере плазменный слой состоит в основном из протонов, и только во время некоторых суббурь количество тяжелых ионов ионосферного происхождения достигает в нем $\approx 50\%$, тогда как в ареомагнитосфере плазменный слой, по-видимому, состоит в основном из тяжелых ионов. Однако, согласно оценкам Кеннела (1989), вследствие малых размеров марсианской магнитосферы суббуря в ней должны быть частыми с характерным временем между ними ≈ 6.5 мин. Положение ареомагнитного плазменного слоя значительно более изменчиво, чем геомагнитного. Это обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что, как показали магнитные измерения на КА «Фобос», индуцированная компонента магнитного поля в ареомагнитном хвосте весьма важна. В таком случае положение плазменного слоя может изменяться при изменении направления

межпланетного магнитного поля. Для выявления этого эффекта необходимо дальнейшее детальное сопоставление результатов плазменных и магнитных измерений в окрестности Марса.

Несмотря на очевидное влияние униполярной индукции на формирование марсианской магнитосферы, вряд ли ее можно полагать полностью «индуцированной» подобно магнитосфере Венеры. Некоторым свидетельством в пользу существования собственного магнитного поля Марса является отмечавшаяся выше значительная толщина ареомагнитного хвоста $\geq 4 R_M$. На соответствующих расстояниях относительная толщина магнитного хвоста Венеры значительно меньше и составляет $\approx 2.2 R_V$ (Грингауз, 1981).

Как отмечалось выше, в эксперименте ТАУС измерялись двумерные спектры тяжелых ионов. Например, два таких спектра, полученные в плазменном слое ареомагнитосферы, на второй и четвертой эллиптических орбитах ($X_{АСЭ} \approx -1,5 \cdot 10^4$ км), приведены на рис. 4. На этом рисунке в пространстве скоростей (при условии, что зарегистрированные ионы являются ионами O^+) изображены изолинии скорости счета КЭУ в канале тяжелых ионов. Хотя энергия планетных ионов в окрестности плазменного слоя на второй орбите (≈ 2 кэВ) была значительно большей, чем на четвертой (≈ 60 эВ), функция распределения ионов имеет общую особенность: разброс скоростей в поперечном направлении наблюдавшихся распределений гораздо больше, чем в продольном. Как и в земной магнитосфере, измерения распределения по скоростям таких ионных пучков могут быть использованы как диагностический инструмент для идентификации процессов ускорения ионов (например, адиабатическая деформация максвелловского распределения, ускорение продольной разностью потенциалов, ускорение в окрестности нейтрального слоя (Истман и др., 1986)).

Представляет интерес по данным спектрометра ТАУС оценить общий поток тяжелых ионов, теряемых планетой через ареомагнитный хвост. Поскольку наибольшие потоки ионов в ареомагнитном хвосте присутствуют в плазменном слое, а форма его в настоящий момент еще не исследована, такую оценку следует рассматривать как предварительную. Для определенности примем, что поперечное сечение плазменного слоя составляет 0.2—0.3 от поперечного сечения хвоста толщиной (4—5) R_M . На второй эллиптической орбите концентрацию и скорость ионов O^+ в плазменном слое по данным ТАУСа можно оценить как $n_i \approx (1-2) \text{ см}^{-3}$, $V_i \approx 150 \text{ км/с}$ (обычно поток ионов в плазменном слое несколько меньше). В таком случае общий поток теряемых через ареомагнитный хвост планетой тяжелых ионов может быть оценен как $(0.5-2) \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}$. Эта величина сопоставима с количеством кислорода, теряемого Марсом в результате нетермической диссипации. Направленный от планеты поток быстрых атомов кислорода, образующихся в результате диссоциативной рекомбинации, составляет $\approx 0.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (см., например, Краснопольский, 1982), т. е. $\approx 4 \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}$ с освещенной части планеты.

Остановимся, наконец, на возможном обнаружении регулярного возмущения солнечного ветра при пересечении космическим аппара-

том орбиты спутника Марса Фобос. Уменьшение потока солнечной плазмы с характерным масштабом 400—500 км поперек орбиты Фобоса по данным ТАУСа наблюдалось на первой и третьей эллиптических орбитах (на второй эллиптической орбите ожидаемое уменьшение совпало с периодическим уменьшением потока ионов из-за вращения КА). Следует отметить, что во время упомянутых пересечений космическим аппаратом орбиты Фобоса сама марсианская луна находилась далеко от него. В этом случае для объяснения наблюдавшихся событий следует предположить наличие на орбите Фобоса пояса газящих пылевых или более крупных частиц. Ранее такая концепция обсуждалась в работах Ипа (1988) и Сотера (1971). Эту интерпретацию, однако, не следует рассматривать как окончательную, сходные возмущения потока солнечного ветра наблюдались экспериментом ТАУС и на других участках орбиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

- Грингауз К. И. // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1976. V. 14. P. 391.
 Грингауз К. И. // *Adv. Space Res.* 1981. V. 1. P. 5.
 Грингауз К. И., Безруких В. В., Веригин М. И. и Ремизов А. П. // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 3349.
 Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н. и др. // *Solar wind interaction with the planets Mercury, Venus, and Mars* / Ed. Ness N. F. NASA SP-397. 1976. P. 1.
 Ип (Ip W.-H.) // *Icarus.* 1988. V. 76. P. 135.
 Истман и др. (Eastman T. E., DeCoster R. J., Frank L. A.) // *Ion acceleration in the magnetosphere and ionosphere* / Ed. Chang T. AGU. Washington, C. D. 1986. P. 117.
 Кеннел (Kennel C. F.) // Частное сообщение, 1989.
 Краснопольский В. А. Фотохимия атмосфер Марса и Венеры. М.: Наука, 1982.
 Нэги и Кравенс (Nagy A. F., Cravens T. E.) // *Geophys. Res. Letters.* 1988. V. 15. P. 433.
 Розенбауэр Х., Шютте Н., Апати И. и др. // *Аппаратура и методы для научных космических исследований* / Под ред. Балебанова В. М. М.: Наука, 1989. С. 3.
 Сотер (Soter S.) // *The dust belt of Mars. Preprint of Center for Radiophysic and Space Research. Cornell University. CRSR-462.* 1974.
 Шютте и др. (Shutte N. M., Kiraly P., Cravens T. et al.) // *Наст. вып.*, 1989.

Поступила в редакцию
7 сентября 1989 г.

Ин-т космических исследований
АН СССР, Москва

Ин-т аэронавтики общества М. Планка, ФРГ
Центральный ин-т физических исследований, Венгрия

Ин-т космических исследований Австрийской АН