

*Вершин и др. 1996г.*

Том 34, Номер 6

Ноябрь - Декабрь 1996

ISSN 0023-4206

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главный редактор  
Л.И. Седов

МАИК "НАУКА"



"НАУКА"

УДК 537.591.4

## ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ МАГНИТОПАУЗЫ МАРСА ОТ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ СПУТНИКА *ФОБОС-2*

© 1996 г. М. Веригин\*, И. Апати\*\*, Г. Котова\*, Ж. Лемэр\*\*\*,  
А. Ремизов\*, Х. Розенбауэр\*\*\*\*, К. Сёге\*\*, Дж. Славин\*\*\*\*\*,  
М. Татральяи\*\*, К. Швингеншу\*\*\*\*\*, Н. Шютте\*

\*Институт космических исследований РАН, г. Москва

\*\*Центральный институт физических исследований, Венгрия

\*\*\*Институт аэрономии, Бельгия

\*\*\*\*Институт аэрономии об-ва М. Планка, Германия

\*\*\*\*\*Годдардовский центр космических полетов НАСА, США

\*\*\*\*\*Институт космических исследований, Австрия

Поступила в редакцию 05.12.95 г.

На основе данных ионного спектрометра ТАУС и магнитометра МАГМА, установленных на борту космического аппарата *Фобос-2*, построена полуэмпирическая модель магнитопаузы Марса, соответствующая периоду максимума солнечной активности. Модель одновременно описывает наблюдающуюся зависимость положения магнитопаузы в хвосте магнитосферы Марса от динамического давления солнечного ветра  $\rho V^2$ , наблюдающуюся зависимость угла атаки магнитопаузы от  $\rho V^2$ , а также три точки пересечения границы магнитосферы с дневной стороны. Форма магнитопаузы в модели определяется в соответствии с уравнением баланса давлений на этой границе, причем внутри магнитосферы принимается во внимание как давление магнитного поля, так и давление ионосферной плазмы. Особенностью модели является то, что положение магнитопаузы в подсолнечной области остается практически неизменным при достаточно больших давлениях солнечного ветра ( $\rho V^2 \geq 6 \times 10^{-9}$  дин/см<sup>2</sup>).

Несмотря на то, что исследования Марса с помощью космических аппаратов начались 30 лет назад (*Mariner-4*, 1965 г.) до сих пор не установлено каким собственным магнитным полем он обладает, не выявлена и роль ионосферы в процессе взаимодействия солнечного ветра с планетой. Изучение вариаций положения околопланетных плазменных границ – магнитопаузы и ударной волны – при изменении динамического давления солнечного ветра позволяет ближе подойти к решению этих проблем.

Зависимость положения марсианской ударной волны от динамического давления солнечного ветра вблизи плоскости терминатора рассматривалась в работах [1, 2]. Однако окончательные выводы относительно природы препятствия сделать на основании этих исследований невозможно, поскольку положение ударной волны зависит еще и от многих неучтенных факторов.

В работах Грингауза и др. [3, 4] качественно было показано, что магнитный хвост Марса сжимается с увеличением динамического давления солнечного ветра. Количественный статистический анализ этого эффекта был выполнен в работе Веригина и др. [5]. Он основывался на предположении о достаточно стабильном положении

магнитопаузы в подсолнечной области. Затем Розенбауэр и др. [6] определили средний угол атаки магнитопаузы – угол между касательной к поверхности магнитопаузы и направлением прихода солнечного ветра – в области ее регистрации на круговых орбитах, а Жанг и др. [7, 8] проанализировали его зависимость от динамического давления солнечного ветра. Эти исследования дают некоторую информацию о форме магнитопаузы планеты.

В настоящей работе будет представлена полуэмпирическая модель магнитопаузы Марса, которая одновременно согласуется с наблюдаемой зависимостью положения магнитопаузы в хвосте магнитосферы от динамического давления солнечного ветра и наблюдаемым соотношением между динамическим давлением солнечного ветра и углом атаки магнитопаузы, а также хорошо описывает имеющиеся три точки регистрации магнитопаузы с подсолнечной стороны планеты.

### АППАРАТУРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Рассматриваемая модель основана на измерениях протонов солнечного ветра, проведенных с помощью энергоспектрометра ТАУС, и измере-

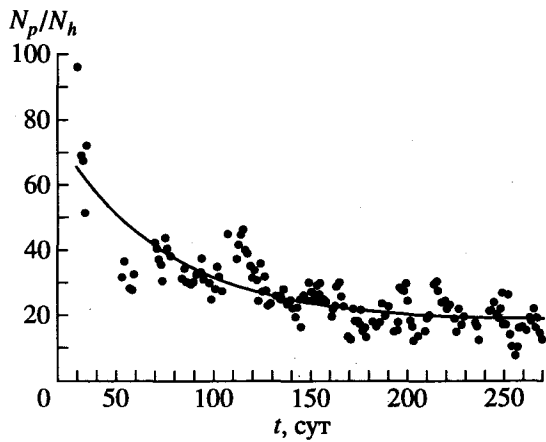


Рис. 1. Изменение со временем отношения среднесуточной величины отсчетов в канале протонов к среднесуточной величине отсчетов в канале тяжелых ионов. Время  $t$  отсчитывается от 01.VII.88 г.

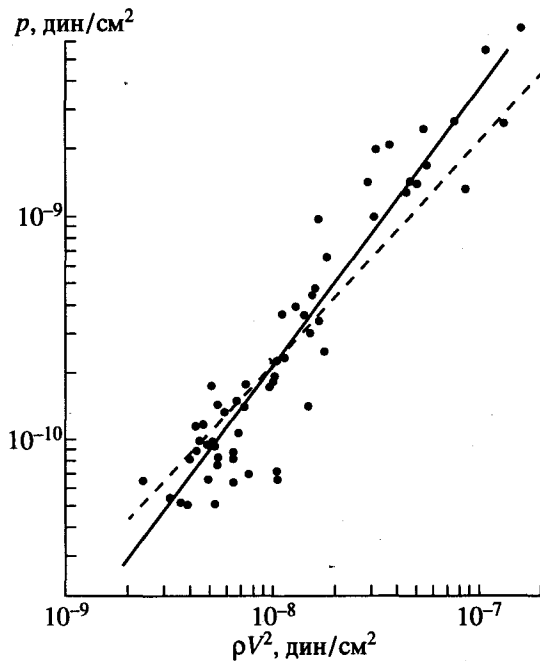


Рис. 2. Зависимость суммы теплового и магнитного давлений от динамического давления солнечного ветра в период измерений на *Фобос-2*.

ниях магнитного поля, выполненных магнитометром МАГМА на борту космического аппарата *Фобос-2*. На большинстве марсианских орбит в феврале–марте 1989 г. спектрометр ТАУС регистрировал спектры протонов в интервале энергий 150 В–6 кэВ каждые 2 мин. Ось поля зрения прибора ( $\sim 40^\circ \times 40^\circ$ ) была направлена примерно обратно направлению прихода солнечного ветра с учетом его абберации вследствие орбитального движения планеты. Более подробно эксперимент ТАУС

описан в работе [9]. Большую часть времени измерения магнитометром МАГМА проводились раз в 45 с в пределах  $\pm 100$  нТ для каждого компонента магнитного поля с разрешением 0.05 нТ [10].

В течение активной жизни спутника пересечения магнитопаузы были зарегистрированы приборами ТАУС и МАГМА на трех эллиптических орбитах с низким перицентром (высота  $h \approx 850$  км над поверхностью планеты) и на нескольких десятках круговых орбит, квазисинхронных с орбитой спутника Марса Фобоса. Всего на круговых орбитах было зарегистрировано 64 пересечения магнитопаузы (исключая многократные), когда проводились измерения обоими приборами и в невозмущенном солнечном ветре и внутри магнитного хвоста Марса. Пересечения магнитопаузы вблизи Марса характеризовались прекращением регистрации прибором ТАУС потоков протонов солнечного ветра [11, 12] и одновременным увеличением модуля магнитного поля (в области магнитного хвоста) или уменьшением турбулентности магнитного поля (с дневной стороны) [13].

Для моделирования формы магнитопаузы очень важны измерения абсолютных значений параметров солнечного ветра и знание ошибок измерений. К сожалению, эффективность регистрации частиц в протонном канале прибора ТАУС систематически уменьшалась в течение полета космического аппарата из-за неполного открытия входной щели пьезоэлектрическим актюатором [5]. Для учета этого эффекта была проведена перекалибровка данных путем сравнения отсчетов в канале протонов ( $N_p$ ) с отсчетами в канале тяжелых ионов ( $N_h$ ), вызванными проникновением части рассеянных протонов в этот канал (рис. 1). Входная щель в канал тяжелых ионов была всегда открыта. Отношение  $N_p/N_h$  было аппроксимировано спадающей со временем экспоненциальной зависимостью (сплошная линия на рис. 1), однако разброс экспериментальных точек достаточно большой и остается существенная неопределенность в таком образом скорректированных данных.

Для обеспечения сопоставимости данных эксперимента ТАУС с данными других спутников, систематически публикуемыми в специальных каталогах, было проведено сравнение с данными спутника *IMP-8*, одновременно работавшего на эллиптической орбите около Земли. Сравнение было проведено для интервала времени, когда космические аппараты и Солнце находились примерно на одной прямой. В конце активной жизни спутника суммарный корректирующий коэффициент, на который следовало умножать данные ТАУСа, составил 2.2.

Значения скорости  $V$ , плотности  $n_p$  (перенормированные) и температуры  $T_p$  протонов солнечного ветра, полученные по данным эксперимента

ТАУС, а также величины модуля магнитного поля  $B$ , измеренные в эксперименте МАГМА, далее использовались для расчета динамического  $\rho V^2$ , теплового и магнитного ( $p$ ) давлений солнечного ветра:

$$\begin{aligned} \rho V^2 &\approx n_p m_p V^2 (1 + n_\alpha m_\alpha / n_p m_p), \\ p &= n_p k T_p (1 + n_\alpha T_\alpha / n_p T_p + \\ &+ (1 + 2n_\alpha / n_p) T_e / T_p) + B^2 / 8\pi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $n_p$  – масса протонов, индекс  $\alpha$  означает, что соответствующие величины относятся к альфа-частицам,  $T_e$  – температура электронов. Использовались средние для солнечного ветра соотношения  $n_\alpha / n_p = 0.047$ ,  $T_\alpha / T_p = 4.9$ ,  $T_e / T_p = 1.9$  [14]. При расчетах брались параметры солнечного ветра, усредненные за 20–30-минутные интервалы времени, за ~30 мин до или после пересечения спутником околопланетной ударной волны при входе спутника в магнитосферу Марса или выходе из нее соответственно [5].

На рис. 2 представлена зависимость величины  $p$  от  $\rho V^2$ . Точками нанесены эти величины, рассчитанные по формулам (1). Сплошной линией показана аппроксимация этой зависимости степенной функцией:

$$p = 1.728(\rho V^2)^{1.232}. \quad (2)$$

Для уменьшения числа свободных параметров при построении модели магнитопаузы будет использоваться эта функция. Штриховой линией на рис. 2 показана зависимость, которой соответствует магнитозвуковое число Маха ~4.6, характеризующее средние условия в солнечном ветре в период измерений на аппарате Фобос-2 [6].

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МАГНИТОПАУЗЫ МАРСА

При построении теоретической модели формы препятствия, обтекаемого солнечным ветром, как в случае индуцированной, так и в случае собственной магнитосферы обычно используется уравнение баланса давлений [15, 16]. Левая часть такого уравнения включает динамическое давление солнечного ветра, а также (не всегда) его магнитное и тепловое давление. В правой части уравнения стоит член, описывающий либо давление собственного магнитного поля планеты, либо давление ионосферной плазмы. Так как для магнитосферы Марса могут оказаться существенными и давление собственного магнитного поля, и давление ионосферы, будем использовать уравнение баланса давлений, в правой части которого

стоит сумма этих давлений:

$$\begin{aligned} k\rho V^2 \sin^2 \alpha + p &= \frac{4f^2 M^2}{8\pi r^6} + p_0 \exp(-(r-r_0)/H), \\ & \quad x > x^*, \\ &= \frac{B^{*2} (y^*)^4}{8\pi (y)}, \quad x < x^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x = x_{ase}$ ,  $y = \sqrt{y_{ase}^2 + z_{ase}^2}$  – координаты точки на поверхности магнитопаузы в планетоцентрической аберрированной солнечно-эклиптической системе координат (предполагается, что ось  $x_{ase}$  направлена противоположно направлению прихода солнечного ветра),  $\alpha$  – угол атаки магнитопаузы (угол между осью  $x_{ase}$  и касательной к магнитопаузе в плоскости, проходящей через  $x_{ase}$ ),  $M$  – магнитный момент планеты,  $p_0$  – давление в ионосфере на расстоянии  $r_0$  от центра планеты,  $H$  – шкала высот ионосферы,  $k \approx 0.88$  (для показателя адиабаты  $\gamma = 5/3$ ) и  $f \approx 1.22$  ( $f^2/k \approx 1.69$ ) – коэффициенты, описывающие передачу давления на магнитопаузу вблизи подсолнечной точки и увеличение магнитного поля вблизи магнитопаузы из-за текущих по этой поверхности токов соответственно [15, 17].

После замены  $\sin^2 \alpha$  через производную  $dy/dx$  уравнение (3) преобразуется в уравнение:

$$\begin{aligned} k\rho V^2 \frac{(dy/dx)^2}{1 + (dy/dx)^2} + p(\rho V^2) &= \\ &= \frac{4f^2 M^2}{8\pi r^6} + p_0 \exp(-(r-r_0)/H), \quad x > x^*, \\ &= \frac{B^{*2} (y^*)^4}{8\pi (y)}, \quad x < x^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где используется также  $p(\rho V^2)$  в соответствии с соотношением (2). Уравнения (3) и (4) предполагают сохранение магнитного потока в долях хвоста магнитосферы планеты ( $x \leq x^* \leq 0$ ). (Параметры  $B^*$  и  $y^*$  обеспечивают непрерывность и гладкость поверхности магнитосферы в точке  $x = x^*$ .) В расчетах использовалась величина  $x^* = 0$ , при которой форма магнитопаузы, определенная по уравнению (4) для чисто магнитного препятствия, приблизительно совпадает с “реальной магнитопаузой” в модели Цыганенко [18], основанной на статистически богатых исследованиях [19, 20]. Соотношение между толщиной магнитного хвоста, расстоянием до магнитопаузы в плоскости терминатора и расстоянием до подсолнечной точки магнитосферы для “реальной магнитопаузы” следующее – 2.58 : 1.34 : 1, а для магнитопаузы, описываемой уравнением (4) – 2.42 : 1.34 : 1.

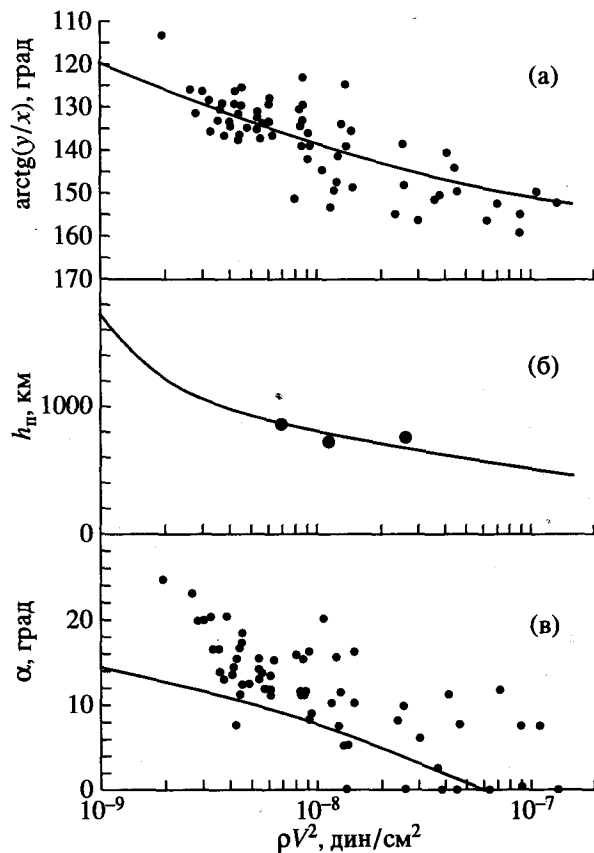


Рис. 3. Сравнение модельных расчетов положения магнитопаузы Марса ( $M = 0.82 \times 10^{22}$  Гс  $\text{см}^3$ ) с наблюдавшимися точками пересечения магнитопаузы на круговых (а) и на эллиптических орбитах (б). Сравнение теоретического угла атаки магнитопаузы с углами, рассчитанными на основе измерений на *Фобосе-2* (в).

Если выбраны значения магнитного момента Марса  $M$ , давления ионосферы  $p_0$  и шкалы высот  $H$ , тогда уравнение (4) позволяет определить положение магнитопаузы и, следовательно, расстояние между наблюдавшейся точкой пересечения магнитопаузы и ожидаемым положением магнитопаузы для любого измеренного значения динамического давления солнечного ветра  $\rho V^2$ . Обратная задача состоит в том, чтобы определить параметры  $M$ ,  $p_0$ ,  $H$ , при которых расхождение между наблюдавшимися точками пересечения магнитопаузы и ожидаемыми положениями магнитопаузы, соответствующими наблюдавшимся величинам  $\rho V^2$ , было бы минимальным.

Имеющиеся экспериментальные данные не позволяют сейчас решить трехмерную задачу оптимизации, при этом более всего недостаточно данных о положении магнитопаузы с дневной стороны планеты. Действительно, всего три пересечения магнитопаузы с дневной стороны главным образом ответственны за определение величин  $p_0$  и  $H$ , и небольшие изменения положения

этих трех точек ведут к значительным изменениям величины  $H$ . Поэтому была зафиксирована величина  $H = 110$  км, которая соответствует двойной шкале высот теплового кислорода в "максимальной" модели атмосферы Марса Мороза и др. [21]. Эта модель была выбрана, так как наблюдения на *Фобосе-2* велись в период, близкий к максимуму цикла солнечной активности. Влияние изменения величины  $H$  на оценки других параметров будет рассмотрено ниже.

Если использовать стандартную процедуру оптимизации отклонений наблюдавшихся точек пересечения магнитопаузы от соответствующих модельных поверхностей, 64 пересечения границы магнитного хвоста будут подавлять влияние трех дневных пересечений, которые, однако, очень важны для моделирования подсолнечной части магнитопаузы. Для того чтобы "уравнять" значение наблюдений магнитопаузы на эллиптических и круговых орбитах, выбирались такие величины  $M$  и  $p_0$ , которые соответствуют минимуму суммы среднеквадратичных отклонений наблюдений дневной магнитопаузы и среднеквадратичных отклонений наблюдений границы хвоста магнитосферы (приведенных к подсолнечной точке).

На рис. 3 представлены результаты такой процедуры оптимизации параметров модели ( $M = 0.815 \times 10^{22}$  Гс  $\text{см}^3$ ). На рис. 3а показана зависимость солнечного зенитного угла ( $\text{arctg}(y/x)$ ) точек пересечений магнитопаузы, зарегистрированных на *Фобосе-2* на круговых орбитах, от динамического давления солнечного ветра; сплошной кривой показана аналогичная зависимость для модельной магнитопаузы. На рис. 3б сплошной кривой показана модельная зависимость высоты подсолнечной точки магнитопаузы  $h_p$  от динамического давления солнечного ветра, точки соответствуют трем дневным пересечениям магнитопаузы, спроецированным вдоль соответствующих модельных поверхностей границы магнитосферы. Их рис. 3а, 3б видно, что модель разумно воспроизводит зарегистрированные пересечения магнитопаузы Марса и их зависимость от  $\rho V^2$ .

Расчеты были выполнены также для различных параметров  $H \neq 110$  км для того, чтобы выявить влияние этого параметра на определение величины  $M$ . Этим влиянием, по-видимому, можно пренебречь, так как изменение шкалы высот  $H$  от 50 до 200 км ведет к незначительным изменениям магнитного момента  $M$  от  $0.84 \times 10^{22}$  до  $0.79 \times 10^{22}$  Гс  $\text{см}^3$ .

До сих пор в нашем рассмотрении угол атаки магнитопаузы никак не участвовал. Для каждого пересечения магнитопаузы, зарегистрированного при некоторых значениях параметров солнечно-

рата падает до очень низких значений после пересечения дневной магнитопаузы, указывая тем самым на существование слоя плотной плазмы внутри магнитосферы. По измерениям с помощью зонда Лэнгмюра 8 февраля 1989 г. на высотах ~1000 км плотность плазмы достигала ~700 см<sup>-3</sup>, однако информация о температуре плазмы отсутствует [26, 27]. Чувствительности радиозатменных методов измерений высотных профилей плотности электронов (~1000 см<sup>-3</sup>) было недостаточно для обнаружения такого слоя плазмы [28].

Рассматриваемая модель магнитопаузы Марса основана на уравнении баланса давлений, выбранного таким образом, чтобы свести к минимуму число свободных параметров. Естественным недостатком такого подхода является необходимость некоторых априорных предположений. К сожалению, чисто эмпирическую модель магнитопаузы, как это сделано для Земли [19, 20], построить для Марса невозможно из-за недостатка данных наблюдений.

Следует отметить, что пересечения магнитопаузы, по которым строилась модель, были зарегистрированы в период, близкий к максимуму солнечной активности, и шкала высот была выбрана, соответствующей этому периоду времени; таким образом, для другого периода цикла солнечной активности модель должна быть модифицирована.

Заключение о существовании собственного магнитного поля Марса, очевидно, может быть сделано только на основе прямых измерений вблизи поверхности планеты. Построенная же модель дает лишь новую оценку магнитного момента планеты (если поле дипольное) – (0.8–1) × 10<sup>22</sup> Гс см<sup>3</sup>, которая соответствует наблюдавшейся зависимости положения магнитопаузы в подсолнечной и в хвостовой областях от динамического давления солнечного ветра, а также зависимости угла атаки магнитопаузы от  $\rho V^2$ .

Следует также отметить, что с формальной точки зрения изгиб кривых на рис. 3б и 4б может быть описан суммой двух давлений, меняющихся по экспоненциальному закону в правой части уравнений (3) и (4). Однако такой подход приводит к неприемлемо высоким давлениям в верхней ионосфере.

Независимо от природы марсианского препятствия описанная модель изменения формы магнитопаузы планеты может быть использована как основа для изучения вариаций околопланетной ударной волны и для дальнейшего изучения распределения магнитного поля в магнитосфере планеты.

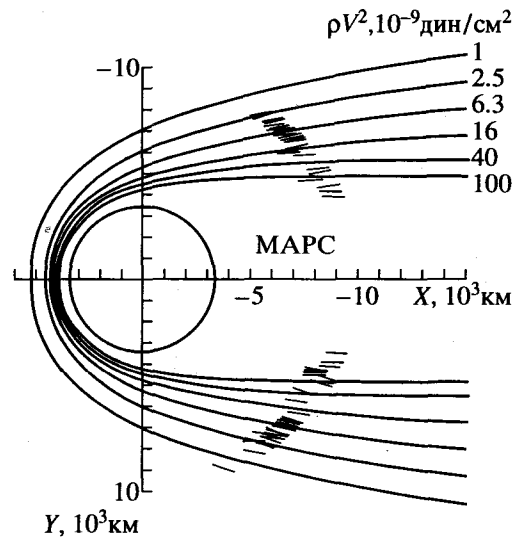


Рис. 5. Изменение смоделированной формы магнитопаузы Марса ( $M \approx 0.89 \times 10^{22}$  Гс см<sup>3</sup>) с динамическим давлением солнечного ветра. Отрезки прямых проведены через точки пересечения магнитопаузы космическим аппаратом, их угол наклона к оси X равен рассчитанному на основе измерений углу атаки магнитопаузы.

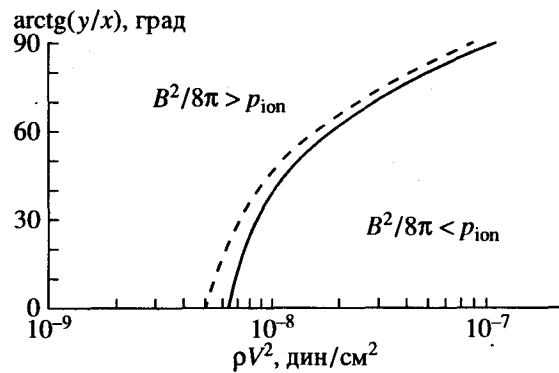


Рис. 6. Области, в которых на магнитопаузе превалирует ионосферное или магнитное давление (для моделей, рассмотренных на рис. 3 и 4).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных ионного спектра ТАУС и магнитометра МАГМА, установленных на борту космического аппарата Фобос-2, построена модель магнитопаузы Марса, соответствующая периоду максимума солнечной активности.

Эта модель одновременно описывает наблюдавшуюся зависимость положения магнитопаузы в хвосте магнитосферы Марса от динамического давления солнечного ветра, наблюдавшуюся зависимость угла атаки магнитопаузы от  $\rho V^2$ , а также три пересечения границы магнитосферы с дневной стороны.

Форма магнитопаузы в модели определяется в соответствии с уравнением баланса давлений на этой границе, причем внутри магнитосферы принимается во внимание как давление магнитного поля, так и давление ионосферной плазмы. Для данного динамического давления солнечного ветра модель определяет интервал зенитных углов, для которых магнитное давление вблизи магнитопаузы превосходит ионосферное.

Одним из свободных параметров модели является величина магнитного момента Марса, который был определен по имеющимся точкам пересечения магнитопаузы и соответствующим величинам динамического давления солнечного ветра с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов. Полученная оценка  $M = (0.8-1) \times 10^{22}$  Гс см<sup>3</sup> практически не зависит от выбранной величины шкалы высот ионосферы.

Особенность модели состоит в том, что положение магнитопаузы в подсолнечной области практически неизменно при  $\rho V^2 \geq 6 \times 10^{-9}$  дин/см<sup>2</sup>, тогда как хвост магнитосферы остается сжимаемым вплоть до очень больших давлений.

Разработанная модель изменения формы магнитопаузы Марса может быть использована как основа для изучения вариаций околопланетной ударной волны и для дальнейшего изучения распределения магнитного поля в магнитосфере планеты независимо от природы марсианского препятствия потоку солнечного ветра.

Данная работа поддержана грантами № 95-02-04223 РФФИ, № MQU000/MQU300 МНФ, № 92-982 ИНТАС и № T015866 ОТКА Венгерского научного фонда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Slavin J.A., Holzer R.E., Spreiter J.R. et al.* Solar wind flow about the terrestrial planets, 2. Comparison with gasdynamic theory and implications for solar-planetary interactions // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № A1. P. 19, 1983.
2. *Schwingshuch K., Riedler W., Zhang T.-L. et al.* The martian magnetic field environment: Induced or dominated by an intrinsic magnetic field? // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12. № 9. P. 213.
3. *Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Remizov A.P.* On electron and ion component of plasma in the antisolar part of near-Martian space // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. № 19. P. 3349.
4. *Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Verigin M.I. et al.* Measurements of electron and ion plasma components along the Mars-5 satellite orbit // *Space Research.* 1976. V. 16. P. 1039.
5. *Verigin M.I., Gringauz K.I., Kotova G.A. et al.* The dependence of the Martian magnetopause and bow shock on solar wind ram pressure according to Phobos 2/TAUS ion spectrometer measurements // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № A2. P. 1303.
6. *Rosenbauer H., Verigin M., Kotova G. et al.* The relationship between the magnetic field in the Martian magnetotail and upstream solar wind parameters // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № A9. P. 17199.
7. *Zhang T.-L., Schwingshuch K., Russell C.T. et al.* Martian magnetotail properties as observed by the Phobos 2 spacecraft // *Geophys. Res. Letters.* 1994. V. 21. № 12. P. 1121.
8. *Zhang T.-L., Schwingshuch K., Petrinec S.M. et al.* Studies of the draping and flaring angles of the Mars and Earth magnetotails // *Adv. Space Res.* 1995. V. 16. № 4. P. (4)99.
9. *Розенбауэр Г., Шюмме Н., Анату 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.
10. *Aydogar U., Schwingshuch K., Schelch G. et al.* The Phobos fluxgate magnetometer (MAGMA) instrument description // *Preprint IWF-8904.* Austrian Academy of Sciences, 1989.
11. *Розенбауэр Х., Шюмме Н., Анату 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.
12. *Rosenbauer H., Shutte N., Apathy I. et al.* Ions of Martian origin and plasma sheet in the Martian magnetotail: Initial results of TAUS experiment // *Nature.* 1989. V. 341. № 6243. P. 612.
13. *Riedler W., Mohlman D., Oraevsky V.N. et al.* Magnetic field near Mars: First results // *Nature.* 1989. V. 341. № 6243. P. 604.
14. *Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J., Gosling J.T.* Plasma and magnetic fields from the Sun // *The solar wind output and its variations* // Ed. White O.R. Colorado Associated University Press. Boulder, 1977. P. 351.
15. *Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y.* Hydromagnetic flow around the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1966. V. 14. P. 223.
16. *Spreiter J.R., Summers A.L., Rizzi A.W.* Solar wind flow past nonmagnetic planets - Venus and Mars // *Planet. Space Sci.* 1970. V. 18. P. 1281.
17. *Slavin J.A., Holzer R.E.* The solar wind interaction with Mars revisited // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № B12. P. 10285.
18. *Tsyganenko N.A.* Modelling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № A4. P. 5599.
19. *Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelov E.C.* Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 5489.
20. *Roelov E.C., Sibeck D.G.* Magnetopause shape as a bivariate function of the interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 21421.
21. *Мороз В.И., Кержанович В.В., Краснополяский В.А.* Инженерная модель атмосферы Марса для проек-

- 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  $\rho V^2$  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  $\rho V^2 \geq 6 \times 10^{-9} \text{ dyn/cm}^2$ .