

УДК 523.62-726

ПОЧЕМУ ПЛОТНОСТЬ ИОНОВ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ЗАВИСИТ ОТ ПЛОТНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА?

© 2024 г. Г. А. Котова*, В. В. Безруких

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: kotova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024

После доработки 21.05.2024

Принята к публикации 27.05.2024

По измерениям тяжелых ($M/q > 3$) ионов на спутнике *Фобос-2* было обнаружено, что плотность этих ионов в центральном плазменном слое ареомагнитного хвоста пропорциональна плотности протонов солнечного ветра, обтекающего планету. При сравнении данных спутника *ISEE-2*, измерявшего ионы в околоземном плазменном слое вблизи нейтрального слоя, с данными по солнечному ветру, полученными на спутнике *ISEE-3*, было установлено, что плотность протонов околоземного плазменного слоя также пропорциональна плотности протонов солнечного ветра. Анализ баланса магнитного и плазменного давлений в солнечном ветре и внутри хвостов магнитосфер Марса и Земли показал, что выявленные ранее корреляции являются следствием необходимого равенства давлений на границе магнитосферы и внутри магнитных хвостов планет.

DOI: 10.31857/S0023420624060014, EDN: IGTRAQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат (КА) *Фобос-2* был запущен к Марсу в 1988 г. и в конце января 1989 г. начал работу на орбитах около планеты. На спутнике был установлен ионный спектрометр ТАУС для измерения характеристик плазмы солнечного ветра и околопланетной плазмы, а также магнитометр МАГМА для измерения магнитного поля. С 20 февраля 1989 г. спутник перешел на круговую орбиту с радиусом около 9500 км ($2.8 R_M$, где $R_M \approx 3400$ км — радиус Марса) и оставался на такой орбите до конца своей работы 27 марта 1989 г. Небольшой период работы космического аппарата около Марса пришелся на максимум цикла солнечной активности, когда динамическое давление солнечного ветра изменялось от 10^{-9} до 10^{-7} дин/см². Это дало возможность исследовать параметры плазмы и магнитного поля около Марса в широком диапазоне параметров солнечного ветра.

С помощью КА *Фобос-2* в хвосте магнитосферы Марса был обнаружен и исследован плазменный слой [1–3]. Этот слой, так же, как и в хвосте магнитосферы Земли [4], расположен вокруг

токового слоя, где компонента магнитного поля, направленная вдоль хвоста, меняет знак. Но есть и ряд отличий плазменного слоя около Марса от околоземного. Прежде всего, основными ионами марсианского слоя являются ионы планетного происхождения, в то время как около Земли плазменный слой образован в основном ионами водорода солнечного ветра. Только во время достаточно высокой магнитной активности ионосферные ионы кислорода составляют заметную часть плазмы вблизи токового слоя в хвосте магнитосферы Земли [напр., 5]. Распределение ионов по скоростям в марсианском плазменном слое анизотропно. Отношение температуры ионов в направлении вдоль магнитного хвоста к температуре ионов в поперечном направлении может достигать $1/7$ [1, 6]. И, наконец, положение плазменного слоя в ареомагнитном хвосте очень изменчиво. Он может наблюдаться и вблизи границы магнитосферы, и в центре хвоста. Ориентация слоя в плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце, также сильно меняется [3].

При анализе механизмов ускорения ионов в марсианском плазменном слое были

рассмотрены корреляции различных параметров слоя между собой и с параметрами невозмущенного солнечного ветра [7]. При этом было получено, что максимальная плотность ионов, наблюдающаяся в области перемены знака продольной составляющей магнитного поля ареомагнитного хвоста, пропорциональна плотности протонов невозмущенного солнечного ветра, измеренной до, при влете аппарата в магнитосферу, или после пересечения околопланетной ударной волны при вылете из магнитосферы. Происхождение такой корреляции объяснено не было.

Примерно в то же время Дж. Боровский с соавторами [8, 9] рассмотрели взаимосвязь параметров плазмы и магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли по данным спутника *International Sun-Earth Explorer 2 (ISEE)* и параметров невозмущенного солнечного ветра, измерявшимся на спутнике *ISEE 3*. Был обнаружен ряд корреляций, в том числе получено, что плотность ионов вблизи нейтрального слоя магнитосферного хвоста пропорциональна плотности ионов солнечного ветра. Авторы связывали полученные результаты с процессами проникновения плазмы солнечного ветра в плазменный слой земной магнитосферы.

В настоящей работе проанализирован баланс плазменного и магнитного давления внутри магнитосферных хвостов Земли и Марса и вблизи границ магнитосфер этих планет и показано, что именно баланс давлений приводит к наблюдаемым корреляциям между плотностью ионов плазменного слоя и плотностью солнечного ветра.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Энерго-масс-спектрометр ТАУС позволял отдельно измерять характеристики протонов, альфа-частиц и тяжелых ионов ($M/q > 3$, M — массовое число, q — заряд). Энергетический диапазон прибора ~ 30 – 6000 эВ был разделен на 32 канала. Угловое распределение частиц складывалось из измерений в 64 (8×8) угловых каналах в поле зрения прибора $\sim 40^\circ \times 40^\circ$ с центральной осью, отклоненной на 5° от направления на Солнце для компенсации абберации прихода солнечного ветра. На круговых орбитах измерялись одномерные энергетические спектры ионов в диапазоне энергий 150 эВ– 6 кэВ в пределах телесного угла $\pm 20^\circ$ от направления оси. Спектр измерялся за 8 с, но передавался раз в две минуты. Магнитные измерения проводились

с помощью магнитометра МАГМА каждые 45 с. К сожалению, в рассматриваемый период большую часть времени КА вращался с периодом ~ 10 мин. вокруг оси, приблизительно ориентированной на Солнце. Из-за вращения аппарата для надежного анализа можно использовать только модуль магнитного поля B и его компоненты B_X вдоль и B_{YZ} поперек линии Солнце — Марс.

Наиболее интересным результатом, касающимся распределения плазмы около Марса, полученным по данным космического аппарата *Фобос-2*, было открытие плазменного слоя в ареомагнитном хвосте [1].

На рис. 1 в левой части [3] показана последовательность усредненных за 4 мин скоростей счета частиц в зависимости от энергии, измеренных прибором ТАУС в режиме регистрации тяжелых ионов. В центре и справа на рис. 1 приведены одновременные результаты измерений, соответственно, абсолютной величины B и B_X компоненты магнитного поля. Приблизительно с $16:00$ до $21:00$ UT *Фобос-2* последовательно переходил из солнечного ветра в магнитослой, (пересечение ударной волны наблюдалось в $16:30$ UT), затем в магнитосферу (пересечение магнитопаузы в $17:23$ UT). Примерно в центре ареомагнитного хвоста с $18:10$ до $18:30$ UT вблизи места смены знака B_X компоненты, то есть вблизи нейтрального слоя, наблюдались наиболее интенсивные потоки тяжелых ионов $F \approx (2-4) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответствующие регистрации плазменного слоя в хвосте магнитосферы Марса. После последующих пересечений магнитопаузы ($\sim 19:32$ UT) и ударной волны ($\sim 20:08$ UT) *Фобос-2* опять вышел в область солнечного ветра. Следует отметить, что спектры ионов солнечного ветра и магнитослоя, представленные на рис. 1, являются спектрами протонов и альфа-частиц, проникающих в канал тяжелых ионов, которые легко выделить при сравнении с одновременно измеренными протонными спектрами. В режиме регистрации протонов и альфа-частиц в области измерения потоков тяжелых ионов потоки протонов не наблюдались.

При обработке данных прибора ТАУС принималось, что в канале тяжелых ионов внутри магнитосферы Марса регистрировались ионы атомарного кислорода O^+ . Об этом свидетельствовали масс-спектрометрические измерения прибора АСПЕРА на том же космическом аппарате, а также имевшаяся информация о составе атмосферы планеты [10, 11]. Форма измеренных спектров тяжелых ионов также свидетельствовала в пользу однокомпонентного состава

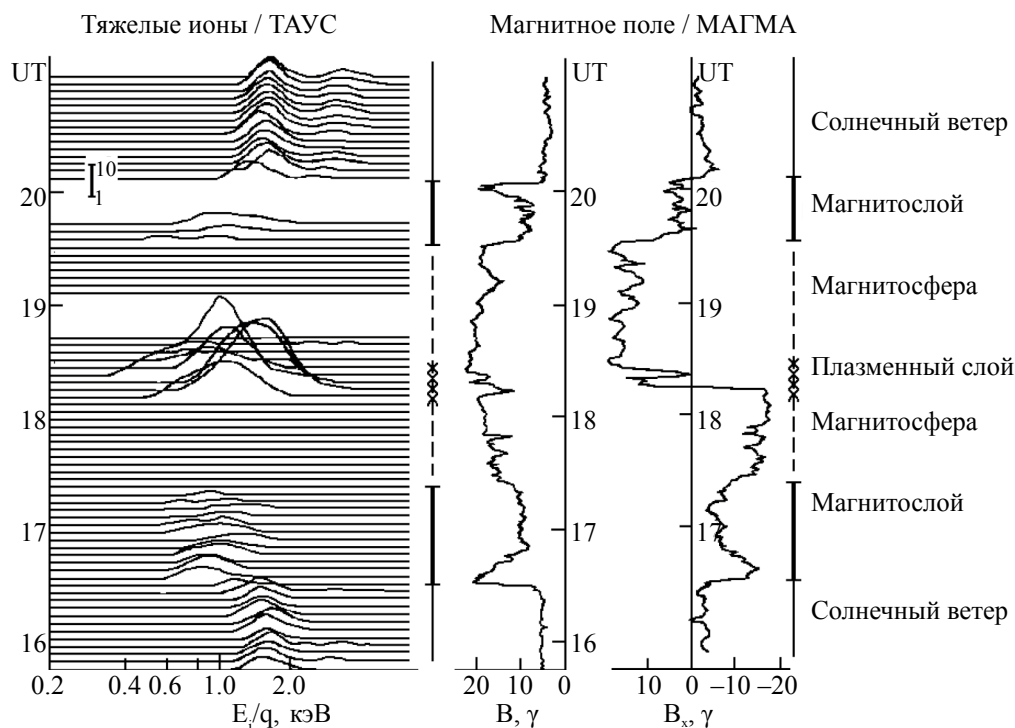


Рис. 1. Энергетические спектры ионов, измеренные прибором ТАУС в режиме регистрации тяжелых ионов 16 марта 1989 г., модуль B и B_x -компонента магнитного поля, по данным прибора МАГМА. Справа сплошной линией отмечены участки траектории в солнечном ветре, жирной линией — в магнитослое, пунктирной — в магнитосфере Марса. Крестиками отмечены места наблюдений потоков тяжелых ионов внутри магнитосферы [3].

плазмы в плазменном слое магнитосферы планеты. Позднее, в магнитосфере Марса космическими аппаратами *Mars Express* и *MAVEN* было зарегистрировано значительное количество ионов молекулярного кислорода O_2^+ , однако было подтверждено, что в областях пересечения КА *Фобос-2* магнитосферы Марса на расстояниях $\sim 2.8 R_M$ и более (на первых эллиптических орбитах) от центра планеты преобладают ионы атомарного кислорода [12].

Для анализа зависимости параметров плазменного слоя в магнитном хвосте Марса от параметров солнечного ветра были отобраны части круговых орбит КА *Фобос-2* при входе спутника в магнитосферу или выходе из нее, где есть данные по магнитному полю в долях хвоста, плазме плазменного слоя и плазме солнечного ветра. Использовались величины плотности, температуры и скорости солнечного ветра, усредненные за интервалы времени однородных данных 20–30 мин, выбранные за 30 мин до или после пересечения околопланетной ударной волны, соответственно, при входе спутника в магнитосферу Марса или выходе из нее. Задержка в 30 мин. между регистрацией ударной волны и интервалом усреднения параметров солнечного

ветра позволяет исключить область торможения солнечного ветра, наблюдавшуюся перед Марсианской ударной волной (рис. 1) [13]. Кроме того, вращение КА обычно приводило к волнообразным изменениям измеренной плотности солнечного ветра, поскольку иногда отклонение оси вращения аппарата от направления на Солнце достигало 20° ; в таких случаях для усреднения выбирались максимальные значения плотности. Также следует иметь в виду, что разница по времени между пересечениями спутником ударной волны и границы магнитосферы составляла около 1 ч. Данные по межпланетному магнитному полю усреднялись за те же интервалы, что и параметры плазмы солнечного ветра.

В долях ареомагнитного хвоста для усреднения выбирались 15-минутные интервалы времени, близкие к границе магнитосферы, когда магнитное поле (B_r) было достаточно стабильным, и не регистрировались ни протоны, ни тяжелые ионы. Иногда в хвосте магнитосферы Марса продольная компонента магнитного поля B_x меняла знак очень близко к границе магнитосферы. Это значит, что нейтральный слой пересекался вблизи границы магнитосферы, и определить средние значения компоненты магнитного

поля в долях хвоста было невозможно. Для статистического анализа параметров плазменного слоя выбирались максимальные значения плотности n_H и скорости ионов V_H в нейтральном слое. Таким образом, было отобрано 39 пролетов спутника при входе в магнитосферу и 26 — при выходе из нее [14].

Измерения плазмы и магнитного поля около Земли рассматривались на основе данных космических аппаратов миссии *International Sun-Earth Explorer: ISEE 2* и *ISEE 3* [9], а также *IMP-8* [15]. Нейтральный слой внутри плазменного слоя в околоземном магнитном хвосте определялся по изменению знака измеренной на *ISEE 2* B_X -компоненты магнитного поля солнечно-эклиптической системы координат. Одновременно, в пределах нескольких секунд, наблюдалось минимальное значение модуля магнитного поля. Каждое пересечение нейтрального слоя сопоставлялось с 5-минутными средними значениями параметров солнечного ветра, измеренными КА *ISEE 3*, с учетом задержки на время прохождения солнечного ветра от места измерения в точке либрации $L1$ до Земли. Это время задержки оценивалось как X / V_{sw} , где X — расстояние от Земли до *ISEE 3*; V_{sw} — измеренная скорость солнечного ветра.

Было отобрано 225 случаев пересечения околоземного нейтрального слоя на расстоянии 17.5–22.5 R_E ($R_E \approx 6370$ км — радиус Земли) от центра Земли в марте — апреле 1979 г., для которых были измерения невозмущенного солнечного ветра [9].

3. КОРРЕЛЯЦИЯ ПЛОТНОСТИ ИОНОВ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ В ХВОСТАХ МАГНИТОСФЕР МАРСА И ЗЕМЛИ С ПЛОТНОСТЬЮ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 2 рассмотрена зависимость плотности тяжелых ионов — ионов атомарного кислорода — от плотности солнечного ветра, обтекающего Марс по данным эксперимента ТАУС на КА *Фобос-2*. Представленные данные получены на круговых орбитах *Фобоса-2* на расстоянии около 9500 км = 2.8 R_M от центра планеты. Параметры солнечного ветра должны были измеряться дважды: перед пересечением около марсианской ударной волны до входа космического аппарата в магнитосферу и после пересечения ударной

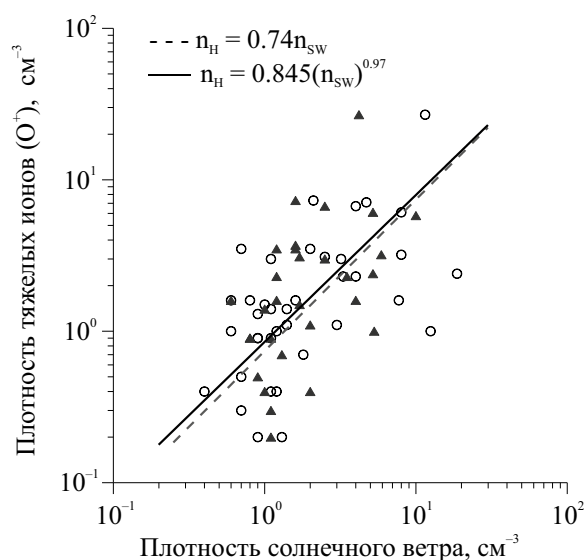


Рис. 2. Зависимость плотности тяжелых ионов (O^+) вблизи нейтрального слоя ареомагнитного хвоста от плотности невозмущенного солнечного ветра. о — измерения на влете в ареомагнитный хвост, Δ — на вылете из него.

волны после выхода *Фобоса-2* из магнитосферы Марса. Однако измерения не всегда осуществлялись непрерывно, поэтому количество точек на рисунке, соответствующих входу и выходу аппарата в / из магнитосферы планеты разное. Аналогичная зависимость плотности ионов плазменного слоя от плотности ионов солнечного ветра была опубликована ранее в работе [7, Fig. 5], но с меньшим количеством точек, поскольку каждому пересечению токового слоя приписывались наиболее близкие по времени параметры солнечного ветра. Большой разброс точек на рис. 2 в первую очередь связан с разницей по времени между измерениями тяжелых ионов в плазменном слое и измерениями солнечного ветра, составляющей 1.5–2.5 ч. Связь плотности ионов в марсианском плазменном слое (n_H) и плотности солнечного ветра (n_{sw}) описывается линейной зависимостью (пунктирная прямая):

$$n_H = 0.74 n_{sw} \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.59$. Значение сплошной линии на рис. 2 будет описано ниже в разделе 7.

На рис. 3 также представлена зависимость плотности ионов в центральном плазменном слое (n_{PS}) от плотности протонов солнечного ветра (n_{sw}), но для околоземного пространства [9]. Так же, как и вблизи Марса, плотность ионов в центральном плазменном слое Земли связана

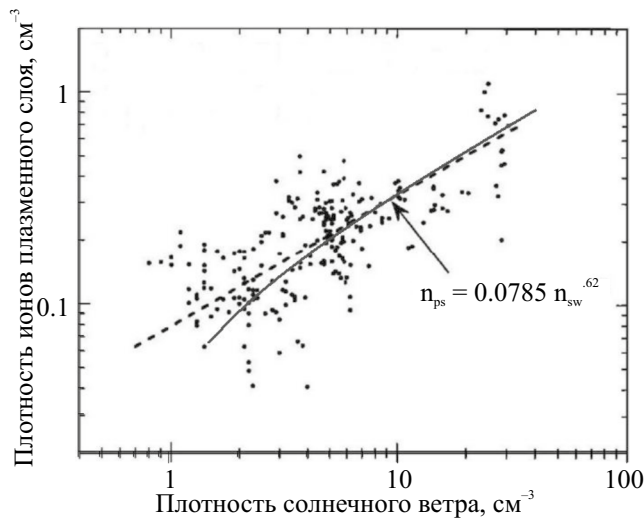


Рис. 3. Зависимость плотности протонов плазменного слоя вблизи нейтрального слоя геомагнитного хвоста от плотности невозмущенного солнечного ветра по данным спутников *ISEE 2* и *ISEE 3*, соответственно [9].

с плотностью ионов солнечного ветра. Зависимость описана степенной функцией (пунктирная прямая):

$$n_{ps} = 0.0785 n_{sw}^{0.62} \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.74$. Сплошная кривая будет описана в разделе 8.

Измерения проводились на расстоянии $d_E = 17.5\text{--}22.5 R_E$ от центра Земли в хвосте магнитосферы. Это расстояние можно сравнить с расстоянием от центра Земли до подсолнечной точки магнитопаузы r_0 , которое характеризует размер магнитосферы Земли, как препятствие потоку солнечного ветра. Так как для Земли $r_0 \approx 10 R_E$ [16], $d_E \approx 1.75\text{--}2.25 r_0$. Измерения на *Фобосе-2* на круговых орбитах около Марса проводились на сравнимых расстояниях в терминах размера препятствия солнечному ветру. В подсолнечной части граница магнитосферы Марса находится на расстоянии $r_0 \approx 4300$ км ($1.25 R_M$) от центра планеты [напр., 17, 18]. Это означает, что в хвосте магнитосферы Марса измерения проводились на расстоянии $d_M \approx 2.2 r_0$, и, следовательно, рассматриваемые измерения вблизи Марса и измерения вблизи Земли велись на сравнимых относительных расстояниях от планеты.

4. БАЛАНС ДАВЛЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕР МАРСА И ЗЕМЛИ

Вблизи границы магнитосферы давление снаружи, равное сумме динамического давления

солнечного ветра, направленного перпендикулярно к поверхности границы, а также теплового и магнитного давлений солнечного ветра, должно быть равно давлению магнитного поля внутри долей хвоста магнитосферы [19]:

$$B_t^2 / 8\pi = K \rho V^2 \sin^2(\alpha) + p, \quad (3)$$

где B_t — величина магнитного поля в долях хвоста; p — сумма теплового и магнитного давлений солнечного ветра; ρ — плотность ионов; V — потоковая скорость невозмущенного солнечного ветра; α — угол расширения (flaring) границы магнитосферы, то есть угол между направлением потока солнечного ветра и касательной к границе; K — константа (обычно используется $K = 0.88$ для течения с постоянной адиабаты $\gamma = 5/3$). Для учета вклада альфа-частиц в плотность солнечного ветра примем, что $K = 1$, тогда можно считать, что $n_{sw} = n_p$ и $\rho = m_p n_{sw}$, где n_p и m_p — плотность и масса протонов солнечного ветра, соответственно. Строго говоря, p — это разница между суммой теплового и магнитного давлений солнечного ветра и тепловым давлением внутри магнитосферного хвоста планеты. Считаем это тепловое давление в долях хвоста равным 0, так как интервалы усреднения магнитного поля в хвосте соответствовали периодам времени, когда плазма не регистрировалась.

В работе Розенбауэра с соавторами [14] по измерениям на *Фобосе-2* была продемонстрирована действительно хорошая корреляция давления магнитного поля в долях хвоста магнитосферы Марса с динамическим давлением солнечного ветра. Полученная зависимость была описана уравнением (3) с параметрами $\sin^2(\alpha) = 0.049 \pm 0.004$, то есть, $\alpha \approx 13^\circ$, и $p = (1.7 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ дин/см². Т. Жанг с соавторами [20] использовали уравнение (3), в котором по измеренным характеристикам солнечного ветра, а именно, плотности, температуре протонов и величине магнитного поля, определялась величина угла α для каждого пролета через ареомагнитный хвост. В результате усреднения рассчитанных углов авторы получили срединный (median) угол расширения границы магнитосферы равный 12.6° и средний угол (mean) равный 13.8° . Эти значения хорошо соответствуют оценке, указанной выше.

На рис. 4 для каждого пролета космического аппарата через хвост магнитосферы Марса среднее измеренное магнитное давление в долях хвоста сравнивается с полным давлением солнечного ветра. Полное давление солнечного ветра на магнитосферу включает в себя динамическое

давление потока, тепловое давление и магнитное давление:

$$p_{SW} = \rho V^2 \sin^2(\alpha) + B_{SW}^2 / 8\pi + n_p k_B T_p + n_e k_B T_e, \quad (4)$$

где B_{SW} — величина магнитного поля солнечного ветра; T_p — температура протонов; T_e , n_e — соответственно, температура и плотность электронов солнечного ветра; k_B — постоянная Больцмана.

При расчетах полного давления принимается, что угол $\alpha = 13^\circ$ для всех пролетов. Температура электронов считается в два раза больше температуры ионов и тепловое давление $p_{th} = 3n_{SW}k_B T_p$, [21]. Видно, что полное давление солнечного ветра на границу магнитосферы приблизительно равно давлению магнитного поля в долях хвоста магнитосферы планеты. Некоторое расхождение давлений в области высоких и низких давлений солнечного ветра, видимо, связано с тем, что для расчетов использовался средний угол α , в то время как реальный угол уменьшается с ростом динамического давления солнечного ветра (рис. 4 в работе [20]).

В магнитном хвосте Земли баланс давлений также неоднократно проверялся [22; 23], и в спокойных условиях постоянство давления поперек хвоста сохраняется, хотя во время развития магнитосферных бурь и суббурь наблюдаются заметные отклонения от стационарного состояния [24].

Для Земли угол расширения магнитопаузы в области магнитного хвоста был определен в

работах [25, 26, 15] по данным космических аппаратов *ISEE* 1 и 2 в магнитосфере и *IMP* 8 — в солнечном ветре. Зависимость (1) для Земли описывается выражением [14]:

$$B_i^2 / 8\pi = (0.134 \pm 0.006) \times \rho V^2 + 5 \times 10^{-10} \text{ (дин/см}^2\text{)}. \quad (5)$$

Таким образом, на расстояниях за Землей $\sim 20 R_E \approx 2r_0$, сравнимых с рассматриваемым расстоянием за Марсом, угол расширения околоземной магнитопаузы составляет $\sim 22^\circ$ [26]. На расстояниях $\sim 30 R_E \approx 3r_0$ за Землей этот угол близок к оценкам угла расширения границы ареомагнитного хвоста на расстояниях $\sim 2r_0$ [15]. Это подтверждает, что ареомагнитный хвост уже, чем геомагнитный.

5. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ ПЛОТНОСТИ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 5 показана зависимость полного давления солнечного ветра от его плотности вблизи хвоста магнитосферы Марса на расстоянии $\sim 2.8 R_M$ от центра планеты по измерениям КА *Фобос-2* на круговых орбитах. Корреляционная зависимость описывается выражением:

$$p_{SW} = 3.45 \times 10^{-10} (n_{SW})^{1.15} \quad (6)$$

с высоким коэффициентом корреляции $R = 0.9$.

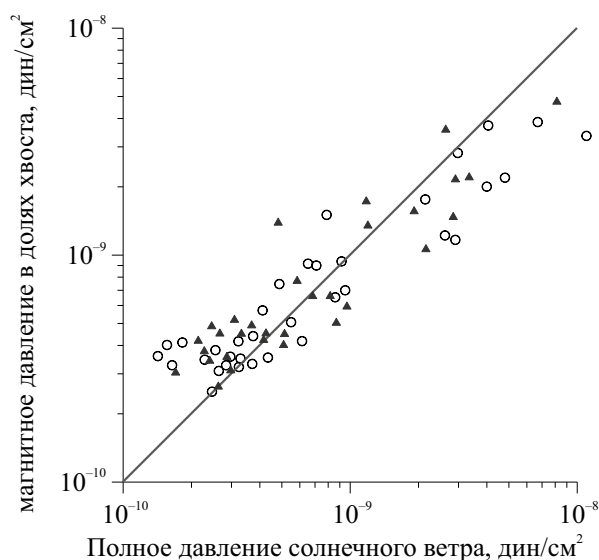


Рис. 4. Сравнение полного давления солнечного ветра с давлением магнитного поля в долях хвоста магнитосферы Марса. Обозначения те же, что и на рис. 2. Сплошная прямая соответствует равенству давлений.

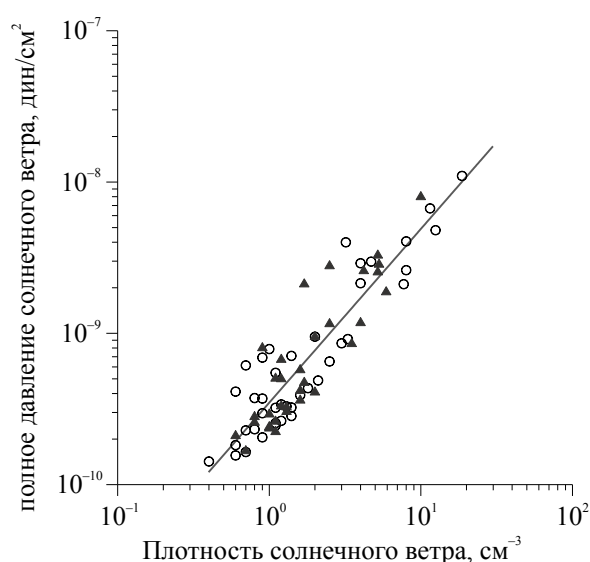


Рис. 5. Зависимость полного давления солнечного ветра от плотности протонов солнечного ветра вблизи Марса. Обозначения те же, что и на рис. 2. Сплошная прямая — зависимость $p_{SW} = 3.45 \times 10^{-10} (n_{SW})^{1.15}$.

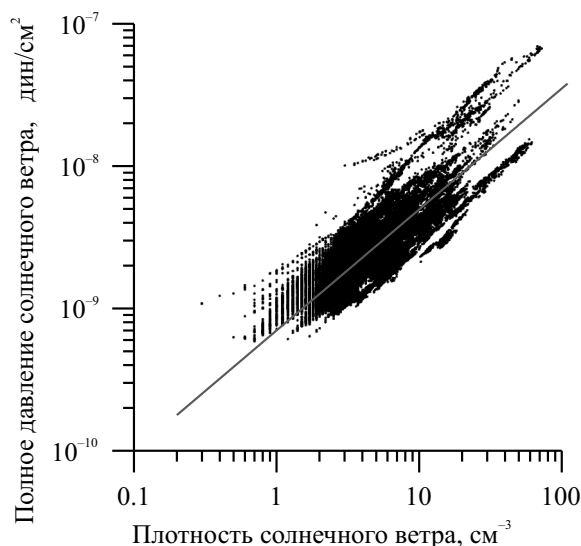


Рис. 6. Зависимость полного давления солнечного ветра от плотности протонов солнечного ветра по данным спутника *ISEE 3*. Сплошная прямая — зависимость $p_{SW} = 7.0 \times 10^{-10} (n_{SW})^{0.82}$.

На рис. 6 представлена зависимость полного давления солнечного ветра, включающего $\rho V^2 \sin^2(\alpha)$ с $\alpha = 22^\circ$, по данным спутника *ISEE 3* (SPDF — Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb) (nasa.gov)), полученным в марте — апреле 1979 г., в период, рассматриваемый на рис. 3. Поправка на время распространения солнечного ветра до Земли здесь не делалась, поскольку она не изменит, полученной корреляции. По этим данным:

$$p_{SW} = 7.0 \times 10^{-10} (n_{SW})^{0.82}, \quad (7)$$

коэффициент корреляции $R = 0.82$.

Ранее было показано, что динамическое давление солнечного ветра (или его поток импульса) инвариантно относительно скорости солнечного ветра [27], некоторая зависимость наблюдается только перед началом больших магнитных бурь [28]. Кроме того, еще в начале космической эры было установлено, что сумма теплового и магнитного давления солнечного ветра не зависит от скорости потока [29], и давление магнитного поля солнечного ветра коррелирует и с динамическим давлением, и с тепловым давлением плазмы [30]. Рисунки 5 и 6 наглядно демонстрируют, что в рассматриваемые периоды времени давление солнечного ветра определяется его плотностью. Действительно, плотность солнечного ветра на межпланетных ударных волнах, при пересечении токовых слоев, пересечении различных волновых структур меняется в два раза и более, в то время как скорость потока

солнечного ветра изменяется на 10–20 % [31]. Несмотря на то, что она входит в выражение для динамического давления в квадрате, на изменение величины этого давления она, обычно, оказывает меньшее влияние, чем плотность. Величины теплового и магнитного давления превышают динамическое давление солнечного ветра на границу магнитосферы только в дальнем хвосте.

Используя данные *Фобоса-2* по тепловому и магнитному давлениям солнечного ветра можно показать, что и они также пропорциональны динамическому давлению и плотности солнечного ветра (напр., рис. 4 в работе [14]). Аналогичные корреляционные зависимости наблюдаются и по данным *ISEE 3*.

6. СРАВНЕНИЕ МАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ В ДОЛЯХ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА С ДАВЛЕНИЕМ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ

На рис. 7 магнитное давление в долях хвоста магнитосферы Марса сопоставляется с давлением в нейтральном слое плазменного слоя. Давление в нейтральном слое состоит из давления поперечной компоненты магнитного поля B_{yz} , направленной перпендикулярно линии Солнце — Марс и теплового давления ионов (кислорода) плазменного слоя. Рисунок 7 показывает,

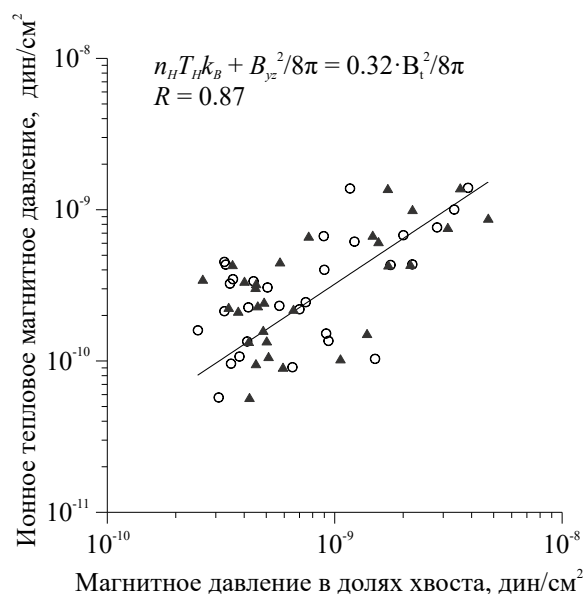


Рис. 7. Сравнение давления в центральном плазменном слое и в долях хвоста магнитосферы Марса. Обозначения те же, что и на рис. 2.

что эти типы давления связаны между собой линейной зависимостью:

$$n_H T_H k_B + B_{YZ}^2 / 8\pi = 0.32 * B_t^2 / 8\pi \quad (8)$$

с высоким коэффициентом корреляции $R = 0.87$. Однако видно, что давление вблизи токового слоя в три раза меньше давления в долях хвоста магнитосферы Марса.

Причин несовпадения значений давления может быть несколько.

Во-первых, как уже упоминалось, в Марсианском плазменном слое, распределение ионов по скоростям сильно анизотропно. Об этом свидетельствуют данные *Фобоса-2* на первых эллиптических орбитах, когда прибор ТАУС измерял двумерные спектры тяжелых ионов приблизительно один раз в минуту [1]. На рис. 8 показан пример измеренного двумерного спектра ионов, предположительно кислорода, на расстоянии ~ 15000 км ($4.4 R_M$) от центра Марса в плоскости близкой к плоскости XZ солнечно эклиптической системы координат [7]. Из рис. 8 видно, что разброс скоростей в направлении оси X в 2–2.5 раза меньше, чем в перпендикулярном направлении. Это означает, что продольная температура меньше поперечной для показанной функции распределения приблизительно в 6 раз. Данные КА *MAVEN* подтверждают наличие

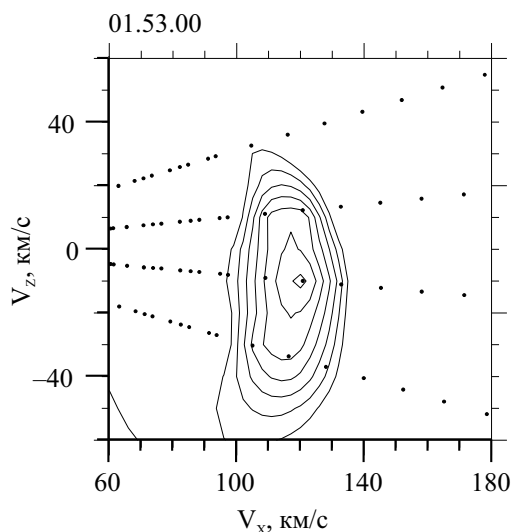


Рис. 8. Двумерные спектры ионов кислорода, измеренные на второй эллиптической орбите *Фобоса-2* около Марса 05.11.1989. Точками отмечены центры интервалов измерения в пространстве скоростей, в которых рассчитывалась функция распределения ионов f . Внешняя изолиния соответствует $f = 10^{-21} \text{ c}^3/\text{cm}^{-6}$, величина f возрастает в $10^{0.2}$ раз к следующей внутренней изолинии.

сильной анизотропии в распределениях ионов по скоростям в ареомагнитном хвосте (см., например, рис. 3 в работе [32]).

На круговых орбитах прибор был ориентирован вдоль оси X и измерял поток ионов от Марса и продольную температуру ионов. Таким образом, тепловое давление в центральном плазменном слое Марса на рис. 7, по-видимому, занижено.

Во-вторых, в хвосте магнитосферы Марса при наблюдении значительных потоков ионов в эксперименте ТАУС регистрировались и потоки электронов с высокими энергиями > 100 эВ прибором ХАРП [33; 34; 35]. Такие электроны регистрировались и на КА *Mars Global Surveyor (MGS)* электронным рефлектметром (ER) [36]. Потоки электронов с такой энергией дают значительный вклад в тепловое давление плазмы.

В-третьих, наличие других ионов помимо атомарного кислорода в плазменном слое магнитосферы Марса также может влиять на баланс значений давления в хвосте ареомагнитного хвоста. Однако на рассматриваемых расстояниях от планеты их присутствие маловероятно. Энергетические спектры ионов, измеренные прибором ТАУС, выглядят однокомпонентными (рис. 1, рис. 8).

7. КОРРЕЛЯЦИЯ ПЛОТНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ С ДАВЛЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДОЛЯХ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА И С ПЛОТНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 9 показана зависимость плотности ионов в центральном плазменном слое от магнитного давления в долях хвоста, которое должно быть равно общему давлению, тепловому плюс магнитному, в плазменном слое. Видимая зависимость (прямая линия) описана степенной функцией

$$n_H = 0.75 \times 10^8 \times (B_t^2 / 8\pi)^{0.84} \quad (9)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.66$.

Таким образом, внешнее давление на границу магнитосферы пропорционально плотности солнечного ветра (6), и давление в хвосте магнитосферы Марса пропорционально плотности тяжелых ионов в плазменном слое (9). Учитывая равенство внутреннего и внешнего давления на границу магнитосферы, комбинация этих двух зависимостей приводит к соотношению:

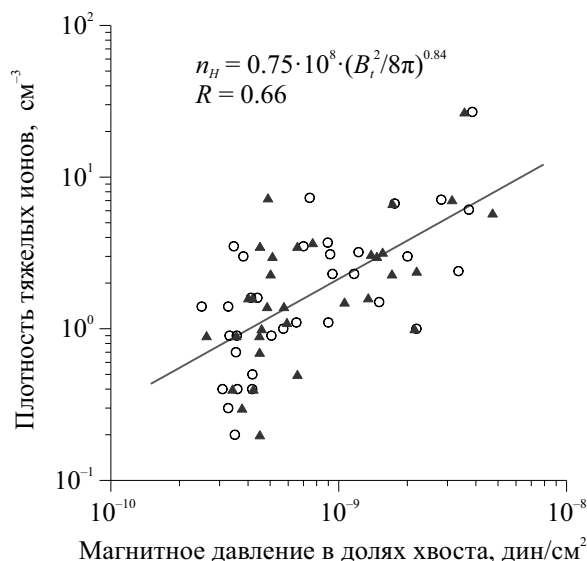


Рис. 9. Зависимость плотности ионов в центральном плазменном слое от магнитного давления в долях хвоста. Обозначения те же, что и на рис. 2.

$$n_H = 0.845 \times (n_{SW})^{0.97}. \quad (10)$$

Зависимость плотностей (10) показана сплошной линией на рис. 2. Видно, что эта зависимость очень близка к (1), которая была получена методом наименьших квадратов, минимизацией отклонений расчетных значений плотностей тяжелых ионов от измеренных. Это свидетельствует о том, что зависимость плотности ионов плазменного слоя от плотности протонов солнечного ветра является следствием баланса давлений поперек магнитного хвоста Марса.

8. СВЯЗЬ ДАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ДИНАМИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Для анализа корреляции плотности ионов в хвосте магнитосферы Земли вблизи нейтрального слоя с плотностью ионов невозмущенного солнечного ветра рассмотрим дополнительно рис. 10, на котором представлена зависимость теплового давления плазмы нейтрального слоя от динамического давления солнечного ветра [9]. В центральном плазменном слое Земли тепловое давление определяется давлением протонов, так как температура электронов очень мала ($T_e \ll T_p$), основной ионной компонентой при спокойных и умеренно-возмущенных геомагнитных условиях выступает водород, распределение протонов по скоростям близко к изотропному [22, 37].

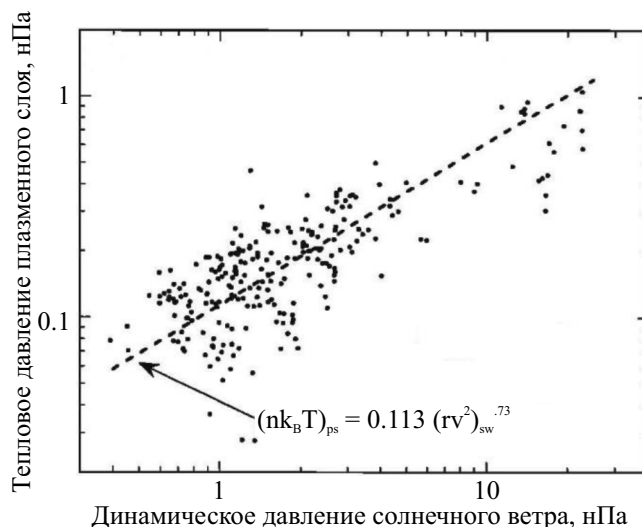


Рис. 10. Зависимость теплового давления протонов в плазменном слое магнитосферы Земли от динамического давления солнечного ветра [9]

Рисунок 10 демонстрирует, что давление плазмы в центральном плазменном слое пропорционально динамическому давлению солнечного ветра:

$$n_{PS} T_p k_B = 0.113 (\rho V^2)^{0.73}, \quad (11)$$

коэффициент корреляции $R = 0.84$. В этом выражении используются нанопаскалы для величин давления. Заменяя их на дин/см² получим:

$$n_{PS} T_p k_B = 0.000782 \times (\rho V^2)^{0.73}. \quad (12)$$

На рис. 4 в работе Дж. Боровского и др. (Fig. 4 в публикации [9]) показана также зависимость полного давления в центральном плазменном слое Земли, теплового плюс магнитного, от динамического давления невозмущенного солнечного ветра. Авторы отмечают, что корреляционная зависимость и коэффициент корреляции для этих величин очень мало отличаются от зависимости (11). Это означает, что магнитное давление в нейтральном слое геомагнитного хвоста на рассматриваемых расстояниях от планеты существенно меньше теплового давления.

Из зависимостей (7), (5) и (12) можно получить соотношение, описывающее связь теплового давления в центральном плазменном слое магнитосферы Земли с плотностью солнечного ветра:

$$n_{PS} T_p k_B = 0.000782 \times \left[0.522 \times 10^{-8} (n_{SW})^{0.85} - 0.373 \times 10^{-8} \right]^{0.73}. \quad (13)$$

Диапазон изменения температуры протонов в геомагнитном хвосте для используемого массива данных спутника *ISEE 2* составляет $2.5 \text{ кэВ} < T_p < 9 \text{ кэВ}$ [9]. На рис. 3 сплошной линией показана зависимость (13) при средней температуре протонов $T_p = 5 \text{ кэВ} \approx 6 \times 10^7 \text{ К}$. Видно, что эта зависимость хорошо описывает массив данных и согласуется с полученной ранее прямой корреляционной зависимостью, показанной пунктирной линией. Таким образом, продемонстрировано, что корреляция плотности ионов плазменного слоя около Земли от плотности протонов солнечного ветра также является следствием баланса давлений поперек магнитного хвоста.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее для объяснения зависимости плотности ионов в нейтральном слое геомагнитного хвоста от плотности ионов набегающего потока солнечного ветра рассматривались процессы заполнения центрального плазменного слоя земной магнитосферы плазмой солнечного ветра через пограничный слой магнитного хвоста (мантию, низкоширотный пограничный слой) и затем через пограничный слой плазменного слоя [9]. Причины выявленной ранее зависимости плотности ионов вблизи токового слоя в хвосте магнитосферы Марса от плотности ионов невозмущенного планетой солнечного ветра по данным космического аппарата *Фобос-2* до сих пор не рассматривались [7]. Объяснение, предложенное Дж. Боровским и его соавторами, не подходит для параметров плазменного хвоста Марса, поскольку Марсианский плазменный слой образован в основном ионами планетного происхождения.

Корреляция плотности ионов в нейтральном слое с плотностью ионов солнечного ветра наблюдается и для хвоста магнитосферы Земли, обладающей достаточно сильным собственным магнитным полем, и для хвоста магнитосферы Марса, который не имеет собственного глобального магнитного поля, поэтому причины такой зависимости плотностей следует искать в каких-то общих физических взаимосвязях, но не в природе препятствий потоку солнечного ветра. Таким общим законом природы является баланс значений давления плазмы и магнитного поля, необходимый для существования вытянутых магнитосферных хвостов планет.

Было показано, что плотность солнечного ветра определяет внешнее давление на границу

магнитосферы, по крайней мере, в периоды, когда анализировались зависимости плотности в плазменных слоях Земли и Марса. Также показано, что плотность ионов вблизи токовых слоев этих планет пропорциональна давлению в долях хвостов и, следовательно, давлению солнечного ветра. Рассчитанные на основании баланса давлений зависимости плотности в центральных плазменных слоях Земли и Марса от плотности набегающего потока солнечного ветра согласуются с зависимостями, определенными ранее при прямом сравнении плотностей ионов в плазменных слоях и в солнечном ветре. Таким образом, причиной выявленных ранее зависимостей плотности ионов в плазменных слоях Земли и Марса от плотности солнечного ветра выступает необходимое постоянство давления поперек магнитных хвостов планет.

Для дополнительного подтверждения рассмотренных взаимосвязей плотностей частиц и давлений в окрестности планет следует проанализировать аналогичные взаимозависимости параметров плазмы и магнитного поля вблизи других планет, например, Венеры и Меркурия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.А. Петруковичу за идею выполненной работы и полезные обсуждения. Авторы благодарны коллегам из Австрии и Германии за плодотворное сотрудничество по проекту “Фобос” и возможность использования полученных магнитных и плазменных данных. Авторы признательны создателям базы данных “<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>” SPDF - Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb) (nasa.gov), включающей данные спутников проекта *ISEE*.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Iss. 6243. P. 612–614. <https://doi.org/10.1038/341612A0>.
2. Розенбауэр Х., Шютте Н., Апати И. и др. Первые результаты измерений ионов марсианского происхождения и обнаружение плазменного слоя в магнитосфере Марса по данным эксперимен-

- та ТАУС на КА «Фобос-2» // Письма АЖ. 1990. Т. 16. № 4. С. 368–377. (Rosenbauer H., Shutte N., Apathy I. et al. First measurements of ions of Martian origin and observation of a plasma layer in the magnetosphere of Mars: the TAUS experiment on the spacecraft *Phobos 2* // Soviet Astron. Lett. 1990. V. 16. Iss. 2. P. 156–160.)
3. Verigin M.I., Rosenbauer H., Shutte N.M. et al. Ions of planetary origin in the Martian magnetosphere (*Phobos-2*/TAUS experiment) // Planet. Space Sci. 1991. V. 39. Iss. 1/2. P. 131–137. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90135-W](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90135-W)
 4. Petrukovich A., Artemyev A., Vasko I. et al. Current Sheets in the Earth Magnetotail: Plasma and Magnetic Field Structure with *Cluster* Project Observations // Space Sci. Rev. 2015. V. 188. P. 311–337. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0126-7>.
 5. Maggiolo R., Kistler L.M. Spatial variation in the plasma sheet composition: Dependence on geomagnetic and solar activity // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 2836–2857. <https://doi.org/10.1002/2013JA019517>.
 6. Котова Г.А., Веригин М.И., Шютте Н.М. и др. Ускорение тяжелых ионов в хвосте магнитосферы Марса по данным экспериментов ТАУС и МАГМА на космическом аппарате Фобос-2 // Косм. исслед. 1999. Т. 37. № 1. С. 31–37. (Kotova G.A., Verigin M.I., Shutte N.M. et al. Acceleration of heavy ions in the Martian magnetosphere tail by the data of the TAUS and MAGMA experiments on the *Phobos-2* spacecraft // Cosm. Res. 1999. V. 37. Iss. 1. P. 27–33.)
 7. Kotova G.A., Verigin M.I., Shutte N.M. et al. Planetary heavy ions in the magnetotail of Mars: Results of the TAUS and MAGMA experiments aboard *PHOBOS* // Adv. Space Res. 1997. V. 20. Iss. 2. P. 173–176. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00529-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00529-2)
 8. Borovsky J.E., Thomsen M.F., McComas D.J. The superdense plasma sheet: Plasmaspheric origin, solar wind origin, or ionospheric origin // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. Iss. A10. P. 22089–22097. <https://doi.org/10.1029/96JA02469>.
 9. Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C. The driving of the plasma sheet by the solar wind // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. Iss. A8. P. 17617–17639. <https://doi.org/10.1029/97JA02986>.
 10. Nagy A.F., Cravens T.E. Hot oxygen atoms in the upper atmospheres of Venus and Mars // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. P. 433–435. <https://doi.org/10.1029/GL015i005p00433>.
 11. Ip W.-H. On a hot oxygen corona of Mars // Icarus. 1988. V. 76. P. 135–145. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90146-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90146-7).
 12. Rojas-Castillo D., Nilsson H., Stenberg Wieser G. Mass composition of the escaping flux at Mars: *MEX* observations // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. P. 8806–8822. <https://doi.org/10.1029/2018JA025423>.
 13. Kotova G.A., Verigin M.I., Remizov A.P. et al. Study of the solar wind deceleration upstream of the Martian terminator bow shock // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. Iss. A2. P. 2165–2173. <https://doi.org/10.1029/96JA01533>.
 14. Rosenbauer H., Verigin M., Kotova G. et al. The relationship between the magnetic field in the Martian magnetotail and solar wind parameters // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. Iss. A9. P. 17199–17204. <https://doi.org/10.1029/94JA00946>.
 15. Ohtani S., Kokubun S. IMP 8 magnetic observations of the high-latitude tail boundary: locations and force balance // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. Iss. A12. P. 20759–20769. <https://doi.org/10.1029/JA095iA12p20759>.
 16. Shue J.-H., Song P., Russe C.T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. Iss. A8. P. 17691–17700. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>.
 17. Веригин М., Анати И., Котова Г. и др. Зависимость размеров и формы магнитопаузы Марса от динамического давления солнечного ветра по данным спутника Фобос-2 // Косм. исслед. 1996. Т. 34. № 6. С. 595–603. (Verigin M., Apathy I., Kotova G. et al. Dependence of Martian magnetopause shape and its dimensions on solar wind dynamic pressure according to *Phobos-2* data // Cosm. Res. 1996. V. 34. Iss. 6. P. 551–558.)
 18. Trotignon J.G., Mazelle C., Bertucci C. et al. Martian shock and magnetic pile-up boundary positions and shapes determined from the *Phobos 2* and *Mars Global Surveyor* data sets // Planet Space Sci. 2006. V. 54. P. 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.01.003>.
 19. Spreiter J.R., Alksne A.Y. Effect of neutral sheet currents on the shape and magnetic field of the magnetosphere // Planet. Space Sci. 1969. V. 17. P. 233. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(69\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90040-3).
 20. Zhang T.-L., Schwingenschuh K., Russell C.T. et al. The flaring of the Martian magnetotail observed by the *Phobos 2* spacecraft // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. Iss. 12. P. 1121–1124. <https://doi.org/10.1029/94GL01073>.
 21. Bame S.J., Phillips J.L., McComas D.J. et al. The *ULYSSES* solar wind plasma investigation: Experiment description and initial in-ecliptic results // Solar Wind Seven. Eds. E. Marsch and R. Schwenn. Proc. the 3rd COSPAR Colloquium Held in Goslar. Germany. Pergamon. 1992. P. 139–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042049-3.50030-2>.
 22. Baumjohann W., Paschmann G., Luhr H. Pressure balance between lobe and plasma sheet // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. Iss. 1. P. 45–48. <https://doi.org/10.1029/GL017i001p00045>

23. Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П. и др. Давление плазмы под магнитопаузой на вечернем фланге в экваториальной плоскости при больших отрицательных X_{GSM} // Геомаг. Аэрон. 2018. Т. 58. № 6. С. 731–739. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060160>. (Znatkova S.S., Antonova E.E., Kirpichev I.P., Pulnits M.S. Plasma pressure under magnetopause on the dusk flank in the equatorial plane for large negative X_{GSM} // *Geom. Aeron.* 2018. V. 59. P. 701–709. <https://doi.org/10.1134/s0016793218060154>.)
24. Petrukovich A.A., Mukai T., Kokubun S. et al. Substorm-associated pressure variations in the magnetotail plasma sheet and lobe // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. Iss. A3. P. 4501–4513. <https://doi.org/10.1029/98JA02418>.
25. Petrinen S.M., Russell C.T. An empirical model of the size and shape of the near-earth magnetotail // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. Iss. 23. P. 2695–2698. <https://doi.org/10.1029/93GL02847>.
26. Nakai H., Kamide Y., Russell C.T. Influences of solar wind parameters and geomagnetic activity on the tail lobe magnetic field: a statistical study // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 5511–5523. <https://doi.org/10.1029/90JA02361>.
27. Steinitz R., Eyni M. Global properties of the solar wind. I. The invariance of the momentum flux density // *Astrophys. J.* 1980. V. 241. P. 417–424. <https://doi.org/10.1086/158355>.
28. Adebisin O.B., Ikubanni O.S., Kayode S.J. Solar wind dynamic pressure dependency on the plasma flow speed and IMF Bz during different geomagnetic activities // *World J Young Researchers.* 2012. V. 2(3) P. 43–54.
29. Burlaga L.F., Ogilvie K.W. Magnetic and thermal pressures in the solar wind // *Sol. Phys.* 1970. V. 15. P. 61–71. <https://doi.org/10.1007/BF00149472>.
30. Yang Z., Shen F., Zhang J. et al. Correlation between the magnetic field and plasma parameters at 1 AU // *Solar Phys.* 2018. V. 293. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1238-5>.
31. Pérez-Alanis C.A., Janvier M., Nieves-Chinchilla T. et al. Statistical Analysis of Interplanetary Shocks from Mercury to Jupiter // *Sol. Phys.* 2023. V. 298. <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02152-3>
32. DiBraccio G.A., Espley J.R., Gruesbeck J.R. et al. Magnetotail dynamics at Mars: Initial MAVEN observations // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. Iss. 21. P. 8828–8837. <https://doi.org/10.1002/2015GL065248>.
33. Shutte N.M., Kiraly P., Cravens T.E. et al. Observation of electron and ion fluxes in the vicinity of Mars with the HARP spectrometer // *Nature.* 1989. V. 341. Iss. 6243. P. 614–616. <https://doi.org/10.1038/341614a0>
34. Шюмте Н., Курай П., Кравенс Т. и др. Наблюдения потоков электронов и ионов в окрестности Марса при помощи спектрометра ХАРП на КА "Фобос-2" // Письма в АЖ. 1990. Т. 16. №. 4. (Shutte N., Kiraly P., Cravens T.E. et al. Observations of electron and ion flux in the vicinity of Mars using the HARP spectrometer on *Phobos 2* // *Soviet Astron. Lett.* 1990. V. 16. Iss. 2. P. 154–156.)
35. Kiraly P., Loch R., Szego K. et al. The HARP plasma experiment on-board the Phobos-2 spacecraft: Preliminary results // *Planet. Space Sci.* 1991. V. 39. Iss. 1/2. P. 139–146. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90136-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90136-X).
36. Halekas J.S., Brain D.A., Lin R.P. et al. Distribution and variability of accelerated electrons at Mars // *J. Adv. Space Res.* 2008. V. 41. Iss. 9. P. 1347–1352. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.034>.
37. Baumjohann W. The near-Earth plasma sheet: An AMPTE IRM perspective // *Space Sci. Rev.* 1993. V. 64. P. 141–163. <https://doi.org/10.1007/BF00819660>.