

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

*Бреусе,
Тришгауз
25*

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XVIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

МОСКВА · 1980

УДК 523.165

*Т. К. Бреус, К. И. Грингауз***О ПРИРОДЕ ПРЕПЯТСТВИЙ, ТОРМОЗЯЩИХ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР
ВБЛИЗИ ВЕНЕРЫ И МАРСА, И ОБ ОСОБЕННОСТЯХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
С АТМОСФЕРАМИ ЭТИХ ПЛАНЕТ**

Обсуждается природа препятствия солнечному ветру у Марса и Венеры по данным советских измерений на АМС серии «Марс» и «Венера».

После опубликования результатов плазменных и магнитных измерений, выполненных при помощи советских искусственных спутников Марса («Марс-2, 3, 5») [1—15] и Венеры («Венера-9, 10») [16—23], возникла продолжительная и еще не окончившаяся дискуссия о природе препятствий, образующих околопланетные ударные волны в солнечном ветре, и о собственных магнитных полях этих планет [24—34].

В частности, в 1976—1978 гг. Расселл [24—29] пересмотрел данные магнитных измерений около Венеры и плазменных и магнитных измерений около Марса, полученные на советских космических аппаратах, и в противоречие с выводами, сделанными авторами этих экспериментов [1, 2, 8, 16], высказал мнение, что Венера должна иметь собственное магнитное поле, большее, чем Марс (Расселл увеличил [26—28] магнитный момент Венеры, оцененный в [16] и уменьшил [24, 25] магнитный момент Марса, оцененный в [1, 2, 8]). По мнению Расселла [24, 25], советские спутники Марса вообще не входили в собственную магнитосферу Марса.

Вместе с тем в этих и более поздних работах Расселла [24, 25, 29], а также и в работах 1979 г. (Интрилигейтор [30], Клотье и Даниель [31]) высказана точка зрения, согласно которой механизмы взаимодействия солнечного ветра с Венерой и Марсом одинаковы, и магнитное поле вблизи обеих планет создают токи, индуцированные в ионосферах под воздействием солнечного ветра.

С первого взгляда представляется, что для такого вывода имеются некоторые основания. Однако более детальное рассмотрение данных, характеризующих области взаимодействия солнечного ветра с Венерой и Марсом, показывает, что имеются существенные различия этих областей, не отмеченные либо недооцениваемые авторами гипотезы о тождественности механизмов взаимодействия солнечного ветра с обеими планетами.

В работах Расселла [24—29] и в некоторых других работах, посвященных рассматриваемой проблеме, использованы далеко не все данные измерений на советских космических аппаратах серий «Марс» и «Венера» даже из числа опубликованных во время подготовки этих работ. Ряд работ [17, 20, 21, 35, 36] опубликован уже после [24—28]; в 1979 г. были получены первые результаты измерений свойств плазмы, магнитного поля, характеристик атмосферы и ионосферы Венеры на аппарате «Пионер-Венера» [37—40].

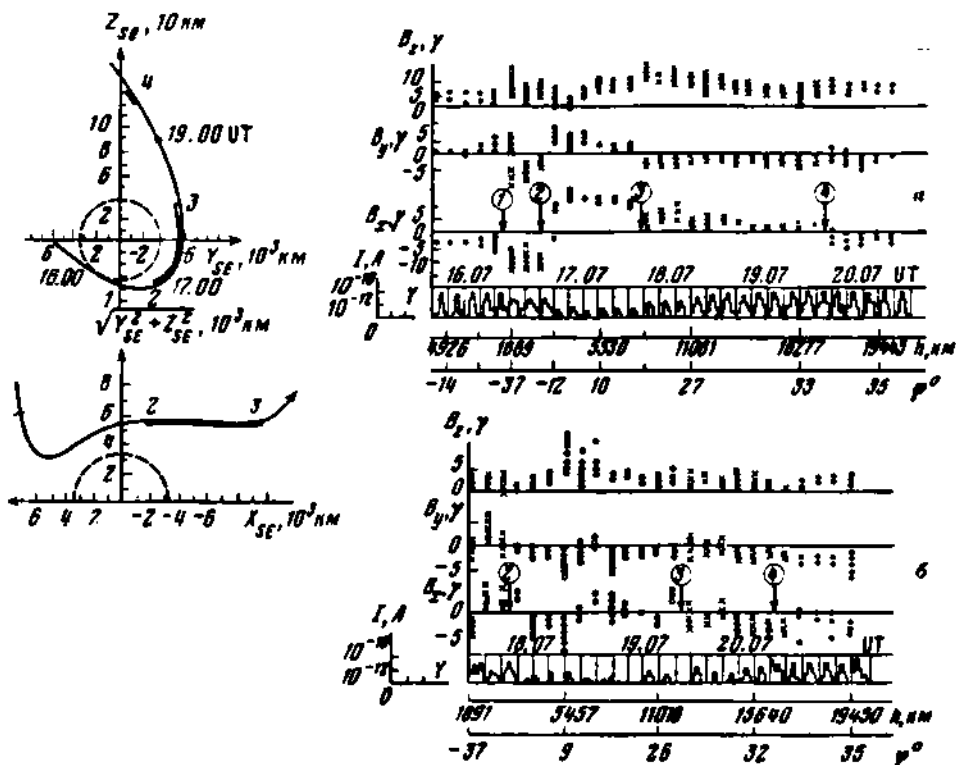


Рис. 1. Данные измерений магнитного поля (B_x , B_y , B_z) и волновые спектры в диапазоне энергий $0-4,1$ кэВ, полученные на аппарате «Марс-5» 13.11.74 (а) и 14.11.74 (б). Слева показана орбита аппарата в системе координат X_{SE} , $\sqrt{Y_{SE}^2 + Z_{SE}^2}$ [8]. Различными значками на магнитограммах показаны данные, относящиеся к положению спутника в солнечном ветре (точки до стрелки I), в переходном слое (крестики I-2 и 3-4) и в предполагаемой магнитосфере (кружки Марса 2-3)

Целями настоящей работы являются:

- 1) сравнение особенностей областей взаимодействия солнечного ветра с Венерой и Марсом с учетом данных, не использованных в [24-29];
- 2) рассмотрение аргументов авторов, отрицающих различную природу препятствий солнечному ветру у Венеры и у Марса в свете имеющихся (в том числе и новейших) экспериментальных данных;
- 3) рассмотрение особенностей взаимодействия солнечного ветра с атмосферой Венеры и Марса.

1. Сходство областей обтекания солнечным ветром Марса и Венеры. Как известно, ударные волны у Марса и Венеры расположены существенно ближе к поверхности планет, чем у Земли, и препятствия, их образующие, имеют сравнительно близкие размеры. Верхние атмосферы и ионосферы планет также имеют большое сходство.

Измерения в окрестностях обеих планет на советских искусственных спутниках показали в ряде случаев, что свойства магнитных полей в глубине зоны обтекания их солнечным ветром зависят от межпланетного магнитного поля. Эта зависимость, наблюдавшаяся в пяти сеансах измерений на аппаратах «Марс-3» — 21.1.1972 г., «Марс-5» 14 и 15, 20 и 24.11.1974 г., послужила основанием для утверждения ([24, 25]), что советские искусственные спутники никогда не входили в магнитосферу Марса, образованную его собственным магнитным полем.

По этим же данным в [24, 25] были заново оценены и понижены величины магнитного момента Марса, по сравнению с приведенными в

[2, 8], и было высказано предположение об ионосферной природе препятствия у Марса.

Остановимся подробнее на этом вопросе.

На рис. 1 приведены две магнитограммы и спектры ионов, полученные на спутнике «Марс-5» 13.II (рис. 1, а) и 14.II 1974 г. (рис. 1, б) [8]. Следует напомнить, что период обращения спутника «Марс-5» вокруг планеты соответствовал периоду собственного вращения Марса, и что поэтому координаты спутника в ареоцентрической системе координат в данной фазе вращения были практически одинаковы для соседних его оборотов вокруг планеты. Это означает, что если Марс имеет собственное магнитное поле, то без учета эффектов, связанных с изменениями обтекающего планету солнечного ветра и межпланетного поля, распределение измеренного магнитного поля вдоль орбиты спутника должно быть почти одинаковым для соседних его оборотов.

По этому признаку область 2—3 на рис. 1, а (13.II) была определена как область магнитосферы, созданной собственным дипольным магнитным полем планеты, поскольку характерная для сеанса 13.II картина поля в области 2—3 наблюдалась на ареографических широтах примерно $-15 \div 20^\circ$ в пяти из девяти сеансов наблюдений на аппарате «Марс-5» и не зависела от ориентации межпланетного магнитного поля.

Вопрос о наклоне марсианского диполя продолжает оставаться спорным. Смирнов и др. в [41] вернулись к первоначальному предположению Долгинова и др. [2] о малом (17°) наклоне марсианского диполя к плоскости эклиптики и привели примеры наблюдений топологии магнитного поля в трех сеансах измерений, напоминающей низкоширотный каси в магнитосфере Марса (с наклоном оси -17°).

Отметим, однако, что в настоящее время, с нашей точки зрения, можно утверждать только то, что наклон диполя к оси вращения планеты по крайней мере не меньше 20° , а, по-видимому, может и превышать 20° , и диполь имеет полярность, противоположную земному дипольному полю (т. е. в южном полушарии B_z -компонента направлена к Солнцу, т. е. $B_z > 0$ (рис. 1, а)).

В четырех сеансах измерений на «Марсе-5», упомянутых в начале этого раздела, наблюдалась картина, подобная рис. 1, б для 14.II 1972 г., в которой B_z -компонента в области 2—3 на тех же ареографических широтах временами имела направление, несвойственное ожидаемому дипольному полю ($B_z < 0$), часто изменяла ориентацию, и в отдельных участках области 2—3 ее ориентация совпадала с ориентацией межпланетного магнитного поля (т. е. с ориентацией B_z перед точкой 1 и после точки 4).

Рассел [24] отмечал также, что с дневной стороны планеты момент измерения максимального значения поля на аппарате «Марс-3» 21.I 1972 г. не соответствовал минимальному расстоянию спутника от планеты, т. е. не совпадал с моментом прохождения перигея орбиты, и это также не могло происходить, по его мнению, в дипольном поле «собственной» магнитосферы Марса.

На рис. 2 и 3 приведены примеры результатов измерений магнитного поля и плазмы на спутниках «Венера-9, 10» в глубине теневого части области обтекания планеты Венеры.

Как выяснилось, в большинстве сеансов измерений у Венеры наблюдалась картина, подобная приведенной на рис. 2 и 3 [16, 17, 21], а именно B_z -компонента магнитного поля в области 2—3 хвоста часто имела направление, несвойственное ожидаемому в дипольном поле [17, 21], изменяла направление в некоторых участках области, и ее ориентация в глубине области часто соответствовала ориентации межпланетного магнитного поля.

Например, 1.XII 1975 г. («Венера-10», рис. 2) или 28.X 1975 г. («Венера-9», рис. 3) различными значками показаны направления B_z -компоненты на плоскости $Z_{\text{ар}}Y_{\text{зе}}$, измеренные вдоль траектории при выходе

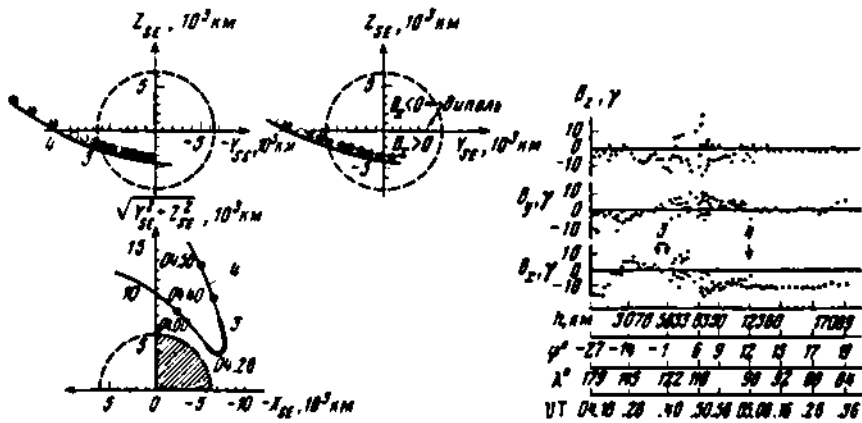


Рис. 2. Магнитограммы, полученные на аппарате «Венера-10» 1.XII 75 [16]. Слева показана орбита аппарата. Различным направлениям B_z — компоненты магнитного поля соответствуют различные значки («к Солнцу» — кружок с точкой, $B_z > 0$; кружок с крестиком — «от Солнца», $B_z < 0$; и кружок — $B_z = 0$), а также в правом кружке показаны ожидаемое направление B_z в дипольном поле. Стрелки с цифрами на магнитограмме отмечают те же области, что и на рис. 1

аппарата из глубины шлейфа в переходной слой (точка 3) и затем в солнечный ветер (точка 4) [16]. В южном полушарии всюду B_z -компонента должна была бы иметь направление к Солнцу ($B_z > 0$) в дипольном поле, что не соответствовало наблюдениям: глубоко в шлейфе B_z -компонента имела направление от Солнца, затем меняла знак еще до выхода в переходной слой, и в солнечном ветре либо сохраняла это направление либо снова приобретала направление от Солнца (1.XII 1975 г.).

Картина изменения B_z -компоненты в этих сеансах сходна с представленной на рис. 1, 6 картиной в магнитосфере Марса 14.II 1974 г.

Характеристики плазмы при входах аппаратов в шлейфы Марса и Венеры оказались также сходными. Изменения свойств области обтекания при пересечениях аппаратом ее характерных границ наблюдались одновременно по плазменным и магнитным данным, например по уменьшению флуктуаций магнитного поля и резкому уменьшению потоков ионов при входе в глубину препятствия из переходной области (см. рис. 1 и 3, переход из области 1-2 и 3-4 в область 2-3).

Напомним, что Расселл в [24, 25] утверждал, что спутники «Марс-3» 21.I 1972 г. и «Марс-5» 15 и 20.II 1974 г. не входили в «собственную» магнитосферу Марса, основываясь только на данных магнитных измерений. Однако полученные одновременно с измеренным магнитным полем плазменные спектры дали картину, характерную для входа в магнитосферу, сходную, например, с картиной пересечения границы магнитосферы Земли [42].

Таким образом, обнаружение в шлейфах всех трех планет — Марса, Венеры и Земли — сходной макроструктуры магнитного поля, а также сходных плазменных образований существенно затруднило интерпретацию результатов и определение природы препятствия только по данным, полученным в шлейфах. Этот вывод отчетливо проиллюстрирован в модельных экспериментах Дубинина и др. [43].

Свойства магнитного поля в шлейфе вблизи Венеры, обнаруженные на «Венере-9, 10», были убедительно объяснены эффектами индукции, создаваемыми поносферными токами, возникающими под воздействием электрического поля $E = -(1/C)(V \times B_{\text{межпл}})$, (где V — скорость солнечного ветра, а $B_{\text{межпл}}$ — межпланетное магнитное поле) [17, 21]. Данные магнит-

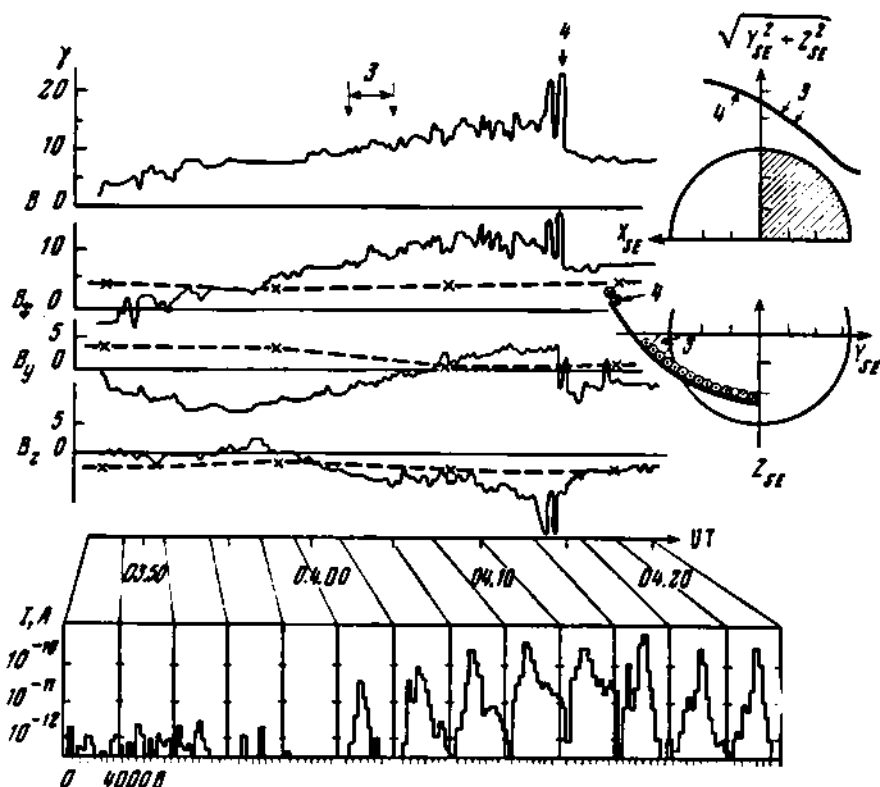


Рис. 3. Магнитограмма ($|B|$, B_x , B_y , B_z) и ионные спектры, полученные на аппарате «Венера-9» 28.X 75. Справа показана орбита в координатах X_{SE} , $\sqrt{Y_{SE}^2 + Z_{SE}^2}$. Стрелками с цифрами обозначены те же области, что и на рис. 1 и 2

ных измерений на аппарате «Пионер-Венера», полученные Расселлом над дневной [37] и ночной [39] сторонами планеты, по существу подтвердили этот вывод, основанный на результатах «Венеры-9, 10». Таким образом, у Венеры препятствие образует, по-видимому, ионосфера и магнитное поле токов, индуцированных в ионосфере солнечным ветром.

Внешнее сходство результатов магнитных и плазменных измерений в четырех сеансах наблюдений у Марса с аналогичными измерениями в большинстве сеансов наблюдений у Венеры, таким образом, давали основания для предположения о сходной природе препятствий у обеих планет.

После опубликования результатов эксперимента «Пионер-Венера» Клотье и Даниель [31], опираясь на свои ранние расчеты и модели «магнитного барьера» и индуцированных токов в ионосферах обеих планет, предложили идентичные модели ионосферных препятствий солнечному ветру для Венеры и для Марса, без учета участия во взаимодействии с солнечным ветром собственных магнитных полей этих планет (аналогичных представлений придерживается Интрилигейтор [30]). По оценкам Клотье и Даниеля [31] Марс имеет собственное магнитное поле слишком слабое для того, чтобы затормозить солнечный ветер ($\sim 25\gamma$ на поверхности), и влияние такого поля может проявляться только в шлейфе планеты.

2. Различия областей обтекания солнечным ветром Марса и Венеры. Несмотря на упомянутые выше кажущиеся сходства свойств препятствий у Марса и Венеры, имеются существенные различия в размерах и неко-

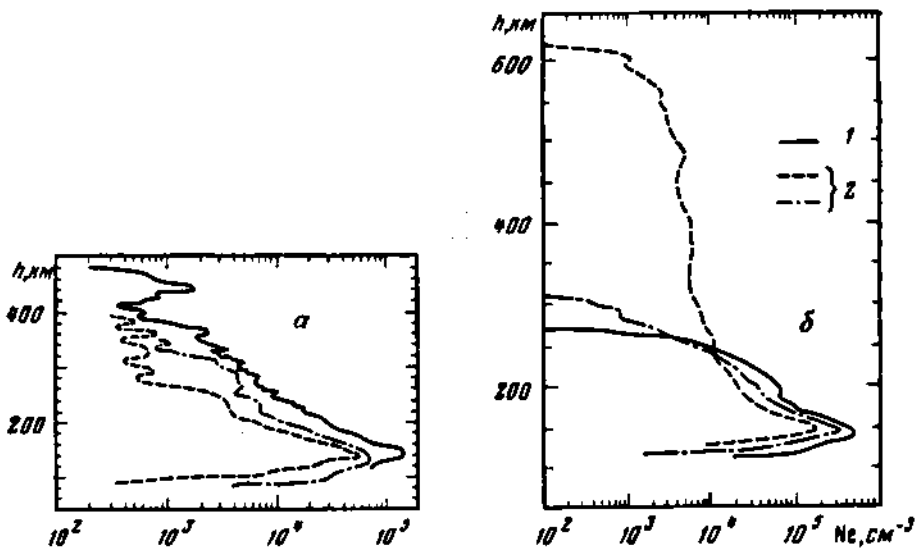


Рис. 4. Распределение электронной концентрации в ионосферах Марса (а) и Венеры (б), полученные на советских искусственных спутниках в различные времена суток, радиозатменным методом.
 а - 1 - день («Марс-2»), 2 - вечер («Марс-4» и «Марс-6») $\Delta N_e \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ - неопределенность полученных значений электронной концентрации; б - 1 - день, $\chi = 14^\circ$; 2 - вечер, $\chi = 63^\circ$ («Венера-10»), $\chi = 83^\circ$ («Венера-9») [33, 42, 44], $\Delta N_e \sim (2+5) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$

торых свойствах этих препятствий, которые противоречат выводам предыдущего раздела.

1. Дневной границей препятствия у Венеры является верхняя граница ее ионосферы - ионопауза (см., например, [21, 38]), наблюдавшаяся на высотах 280+300 км в виде резкого спада электронной концентрации в ионосфере, происходящего на протяжении 50+100 км ([36]).

Если вслед за Расселлом [24] и Клотье и Даниелем [31] предположить, что препятствием у Марса, так же как и у Венеры, является его ионосфера, а границей препятствия - ионопауза, обнаруженная на высоте 280+300 км во время прямых измерений $N_e(h)$ -профиля на аппарате «Викинг-2», то представляет интерес сравнить свойства препятствий, сравнивая свойства ионосфер обеих планет.

Следует ожидать, что верхние ионосферы обеих планет должны подвергаться непосредственному воздействию солнечного ветра, и их свойства должны отличаться от свойств ионосферы, защищенной собственным магнитным полем, в частности земной.

Используем для такого сравнения статистически богатые данные об $N_e(h)$ -профилях, полученные радиозатменными методами одной и той же группой экспериментаторов на искусственных спутниках Марса и Венеры [36, 44-46].

Из сравнения $N_e(h)$ -профилей в ионосферах Марса и Венеры (рис. 4) можно сделать следующие заключения:

а) если у Венеры в пределах измерений $N_e(h)$ радиозатменным методом отчетливо наблюдалась резкая верхняя граница ионосферы - ионопауза, то у Марса не было четкой границы, заметной на фоне флуктуаций концентрации N_e на уровне пределов чувствительности этого метода;

б) из суточных вариаций радиозатменных $N_e(h)$ -профилей на Марсе видно (рис. 4), что с увеличением зенитного угла Солнца χ , т. е. при

переходе от дневных областей к областям вблизи терминатора, ионосфера Марса становилась менее протяженной, и вариации N_e не только в максимуме ионопаузы, но и в верхней ионосфере хорошо описывались простыми закономерностями, свойственными земной ионосфере (фотохимическим равновесием в области максимума и влиянием эффекта диффузии на некоторой высоте над максимумом [46, 47]).

Экспериментальные $N_e(h)$ -профили, полученные во время прямых измерений в ионосфере Марса на «Викинггах», Клотье и Даниель [31] описали моделью, включающей на высоте $h > 250$ км конвекцию ионосферной плазмы в поле «магнитного барьера», образованного межпланетным полем, поджатым над ионопаузой. При этом для сохранения баланса давлений на ионопаузе при динамическом давлении солнечного ветра $\rho V^2 \cos^2 \psi \sim 1,6 \cdot 10^{-4}$ дин/см²·с и $N_e K(T_e + T_i) \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$ дин/см²·с [48, 49], магнитное поле «барьера» на $h = 250$ км должно быть порядка 60γ . Однако магнитное поле такого же порядка величины на высоте ионопаузы может соответствовать и собственному полю планеты, если экстраполировать на эти высоты измеренное в перигеетре орбиты «Марса-2» на $h = 1000$ км при $\chi = 35 \div 45^\circ$ поле $\sim 30 \gamma$ [16], считая его собственным дипольным полем планеты. В таком случае картина конвекции в модели Клотье и Даниеля [31] может соответствовать конвекции плазмы в собственной магнитосфере Марса, а ионопауза у Марса может быть границей типа земной плазмопаузы. Свойства марсианской дневной ионосферы, как было показано выше, соответствовали свойствам ионосферы планеты, защищенной от непосредственного воздействия солнечного ветра собственным магнитным полем. В то же время на аппарате «Марс-2» для $\chi = 34 \div 37^\circ$ на высоте $1000 \div 1500$ км были зарегистрированы типичные для входа в дневную магнитосферу планеты резкие изменения свойств плазмы и магнитного поля переходного слоя. Эта граница и была определена как граница препятствия, т. е. «собственной магнитосферы Марса» [6].

В ионосфере Венеры наблюдалась несколько иная картина. Протяженность дневной ионосферы Венеры по радиозатменным данным в отличие от марсианской увеличивалась с ростом зенитного угла; высота верхней границы ионопаузы h_e возрастала, причем $h_e(\chi)$ вплоть до $\chi \approx 60 \div 70^\circ$ примерно соответствовала зависимости $1/\cos^3 \chi$ [36], определяемой балансом на ионопаузе с динамическим давлением солнечного ветра $\rho V^2 \cos^2 \chi$ [21]. Область над максимумом ионопаузы у Венеры (в особенности образующийся здесь «ионослой»), не удается описать чисто ионосферными механизмами без учета непосредственного воздействия на ионосферу солнечного ветра [21, 50].

Таким образом, свойства верхних ионосфер Марса и Венеры различны, и у Венеры очевиден непосредственный контакт плазмы солнечного ветра с ее ионосферой, т. е. ионопауза в действительности является границей между тепловой ионосферной плазмой и солнечным ветром.

Следует подчеркнуть, что метод расчета $N_e(h)$ -профиля с учетом конвекции в поле «магнитного барьера», применяемый Клотье и Даниелем [31], в случае ионосферы Марса, оказался менее успешным, когда они использовали его для расчета $N_e(h)$ -профиля в ионосфере Венеры.

Авторы объясняют это обстоятельство большей подвижностью верхней границы ионосферы Венеры, связанной с воздействием солнечного ветра, признавая, таким образом, по существу различие свойств верхних ионосфер обеих планет.

Таким образом, если верхняя граница препятствия у Марса на дневной стороне планеты проходила в области высот ~ 1000 км (по данным «Марса-2» [6]), то в рассмотренном случае размеры препятствия у Марса в лобовой области обтекания в 3 раза превосходили размеры препятствия у Венеры.

Марс, очевидно, имеет большие, чем Венера, и поперечные размеры

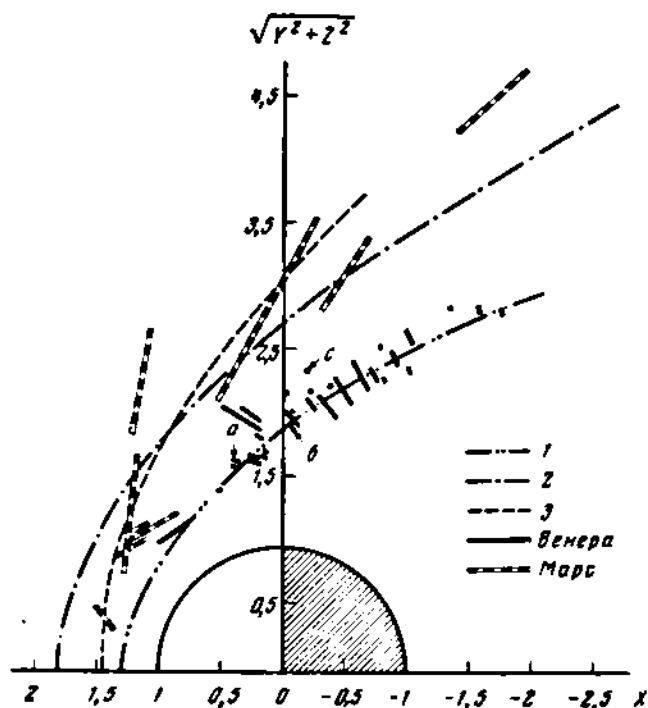


Рис. 5. Средние положения ударной волны у Венеры и Марса и пересечения фронта аппаратами «Венера-9 и 10». 1 — Венера (Веригин и др. [20]), 2 — Марс (Грингауз [7]), 3 — Марс (Вайсберг и др. [12]) и пересечения фронта ударной волны, полученные в эксперименте с широкоугольными детекторами

препятствия: в районе терминатора высота препятствия у Марса ~ 2000 км (Вайсберг и др. [14, 15], Долгинов, Грингауз и др. [16]), а у Венеры ~ 1000 км (Веригин и др. [20]). Авторы [41], предположившие существование низкоширотного каспа в марсианской магнитосфере, отмечали, что: «Собственное поле Марса, по-видимому, достаточно для того, чтобы увеличить поперечное сечение магнитосферы вблизи терминатора и в хвосте по сравнению с атмосферным взаимодействием, свойственным Венере».

2. Как известно, одним из существенных отличий областей взаимодействия Марса и Венеры с солнечным ветром являются более удаленные от планеты положения фронта ударной волны у Марса по сравнению с Венерой.

Расселл [24, 25] и Вайсберг и др. [13, 14] считают, что среднее положение фронта ударной волны у Марса находилось ближе к планете, чем у авторов гипотезы «собственной» магнитосферы Марса (Долгинова и др. [51, 52], Грингауза и др. [3, 4]), т. е. ближе, чем это могло быть в случае существования у Марса собственного магнитного поля с величиной, соответствующей оценкам Долгинова и др. [51, 52].

Среднее положение фронта ударной волны, вообще говоря, не характеризует природу препятствия, ибо модель препятствия должна позволять объяснить все положения фронта (включая наиболее удаленное от планеты). Использование среднего положения фронтов ударных волн для анализа природы препятствия Вайсбергом и др. [13, 14] и Расселлом [24, 25] неоднократно подвергалось критике (Грингауз [7], Грингауз и др. [53], Долгинов [35], Бреус [21]).

Однако даже сравнение средних положений фронтов ударных волн у обеих планет показывает, что фронт у Венеры расположен значительно ближе к планете, чем у Марса. На рис. 5 показаны среднее положение фронта ударной волны у Марса по данным Вайсберга и др. [13], которое ближе к планете, чем согласно определению Грингауза и др. [54], и положение фронта ударной волны у Венеры по данным 32-х пересечений фронта спутниками «Венера-9, 10» (Веригин и др. [20]). Очевидно, что фронт ударной волны у Венеры расположен ближе к планете, чем у Марса. Это вполне согласуется с отмеченным выше меньшим размером препятствия у Венеры по сравнению с Марсом.

3. Придерживаясь гипотезы об ионосферной природе препятствия у обеих планет, Расселл считал, однако, что препятствие у Марса может быть больших размеров, чем у Венеры, за счет большей проводимости марсианской ионосферы по сравнению с ионосферой Венеры [28].

Сравнение свойств атмосфер и ионосфер обеих планет не дает оснований для такого вывода.

В таблице приведены характеристики ионосфер и нейтральных атмосфер планет, значения магнитного поля по оценкам Расселла [25] и Долгинова и др. [16, 51], а также рассчитанные для указанных характеристик необходимые для оценки проводимости ларморовские частоты ω_c и ω_i и частоты соударений ν_{en} и ν_{in} электронов и ионов. Для расчетов ν_{en} и ν_{in} использовались данные наиболее поздних атмосферных моделей, опирающихся на экспериментальные данные (полученные, в частности, на «Викинггах»), по которым атмосферы обеих планет в области высоты главного максимума ионизации состоят практически полностью из CO_2 , а ионосферы — из O_2^+ [47, 50]. В атмосфере Венеры кроме CO_2 содержится атомарный кислород, причем на $h=160$ км $n[\text{O}] \sim 50\% n[\text{CO}_2]$ [50, 57]; учет присутствия значительных концентраций O в атмосфере Венеры, которыми здесь пренебрегали, должен только повысить оценку проводимости ионосферы Венеры.

В последних двух столбцах таблицы приведены оценки педерсеновской σ_1 и холловской σ_2 проводимостей ионосфер в главном максимуме ионизации для различных оценок магнитных полей планет. По-видимому, для сопоставления можно ограничиться значениями проводимостей σ в максимуме, так как верхние атмосферы планет имеют достаточно близкие для такого сопоставления протяженности и свойства (рис. 4).

Учитывая данные «Пионер-Венера», величина магнитного поля в ионосфере у Венеры должна быть уменьшена по сравнению с $B_0=10\gamma$, измеренной на «Венере-4» на высоте 200 км [51]. Использование меньших значений B увеличит оцененные проводимости ионосферы Венеры, так же как и учет других, помимо CO_2 , составляющих, содержащихся в ее атмосфере.

Из таблицы следует, что при полученных Долгиновым и его соавторами значениях магнитных полей обеих планет проводимость ионосферы Венеры более чем на порядок превосходит проводимость ионосферы Марса.

Планета	h_{max} , км	h возмущаем., км	N_{max} , см ⁻³	T_e , К	$n[\text{CO}_2]$, см ⁻³	T_n , К	$B_0 \gamma$	ω_c , с ⁻¹	ω_i , с ⁻¹	ν_{en} , с ⁻¹	ν_{in} , с ⁻¹	σ_1 , мОм	σ_2 , мОм
Марс	135 [44]		$1,7 \cdot 10^8$ [44]	300	$8 \cdot 10^8$ [47]	180° [55]	а) 90 [51] б) 5 [25]	0,15 0,015	0,15 0,015	23 23	4,6 4,6	0,02 0,02	0,55 5,5
Венера	140 [36]	300+500 [36]	$5 \cdot 10^8$ [36]	400	$4 \cdot 10^{10}$ [50]	$285+10^\circ$ [56]	10 [16]	0,03	0,03	132	23	0,6	0,6

Для значения $B_0 \sim 5\gamma$ у Марса, полученного Расселлом [25], проводимости примерно одного порядка. Следует подчеркнуть также, что электрическое поле $E = -(1/C)(V \times B_{\text{межпл}})$, индуцирующее токи $j = \sigma E$ (где V — скорость солнечного ветра, а $B_{\text{межпл}}$ — межпланетное магнитное поле) в ионосфере Венеры, вообще говоря, должно превосходить электрическое поле, индуцирующее токи в ионосфере Марса из-за уменьшения $B_{\text{межпл}}$ в среднем в 2–3 раза с увеличением гелиоцентрического расстояния от Венеры до Марса.

Таким образом, представление о более интенсивном индуцированном магнитном поле у Марса, увеличивающем размеры его препятствия более чем в 3 раза по сравнению с препятствием у Венеры за счет большей проводимости марсианской верхней атмосферы, представляется необидительным.

Приведенные выше соображения о положении фронта и размерах препятствия у Венеры и Марса подкрепляют точку зрения о существовании «собственной» магнитосферы у Марса.

4. Для объяснения природы препятствия из анализа положения фронта ударной волны *принципиальное значение имеет различный характер вариаций фронта у Марса и Венеры* (Грингауз [7]).

Из рис. 5 отчетливо видно стабильное положение ударного фронта у Венеры и большая амплитуда вариаций положения фронта у Марса. По данным Богданова и Вайсберга [12], изменение положения подсолнечной точки фронта ударной волны у Марса достигало $1R_{\text{м}}$.

Большая амплитуда вариаций фронта ударной волны, по порядку величины соответствующая размерам магнитосферы в лобовой области (ΔR магнитосферы/ R магнитосферы), как известно, наблюдалась у планет, имеющих собственное магнитное поле, таких, как Земля и Юпитер. Предполагалось в [12, 41], что такая амплитуда вариаций могла быть связана с изменением ориентации сильно наклоненного магнитного диполя при его вращении. Однако выявить такую зависимость авторам [12, 41] не удалось.

По данным же наблюдений $N_p(h)$ -профилей радиозатменными методами на советских спутниках Марса и аппаратах серии «Маринер» не обнаружено значительных вариаций протяженности марсианской ионосферы и высоты ее верхней границы. В то же время у Венеры высота ионопаузы взмывалась от 280–300 км до более чем 1000 км по данным «Пионер-Венера» при сравнительно стабильном положении фронта.

Таким образом, удаленные пересечения фронта ударной волны у Марса и большая амплитуда его вариаций не могут быть объяснены в рамках представлений об ионосферной природе марсианского препятствия.

5. В вариациях фронта ударной волны у Марса проявляется аналогичная околоземной ударной волне тенденция удаления фронта ударной волны при уменьшении динамического давления солнечного ветра ρV^2 (и наоборот).

У Венеры наблюдались случаи, когда положение фронта имело необычную зависимость от ρV^2 (Веригин и др. [20]). Так, например, на рис. 5 в точках a и b положение фронта соответствовало динамическим давлениям $4 \cdot 10^{-8}$ и $4,2 \cdot 10^{-8}$ дин/см², а в точке c значение ρV^2 существенно возросло ($8,4 \cdot 10^{-8}$ дин/см²), однако фронт ударной волны отодвинулся от планеты.

Такое различие в поведении фронта ударной волны у Венеры Марса качественно можно объяснить (Бреус [21]) участием в балансе давлений на границе препятствия у Венеры индуцированного поля $B_{\text{инд}}$.

Поскольку поле $B_{\text{инд}}$ создается токами, генерируемыми электрическим полем $E = -(1/C)(V \times B_{\text{межпл}})$, то при возрастании скорости солнечного ветра и соответственно ρV^2 $B_{\text{инд}}$ должно также возрастать, и баланс давлений может поддерживаться при прежнем положении границы. Таким образом, граница препятствия в присутствии индуцированного магнитного поля может вести себя иначе, чем граница собственной магнитосферы.

«Собственная» магнитосфера Марса, однако, имеет относительно малые масштабы.

Ранее отмечалось (Долгинов, Грингауз и др. [16]), что из-за сравнительно малых ее размеров, например, при высоком динамическом давлении солнечного ветра магнитопауза могла приближаться к поверхности планеты на достаточно малые расстояния, и плазма переходного слоя могла непосредственно взаимодействовать с ионосферой. В таких случаях в ионосфере должны индуцироваться интенсивные токи, и магнитное поле этих токов отчетливее проявится в структуре области обтекания, изменяя картину дипольного поля вблизи Марса. Так, например, в сеансе измерений 20.II 1974 г. на «Марсе-5», как уже говорилось, наблюдалось изменение знака V_x -компоненты в области 2–3, характерное для влияния эффекта индукции. Действительно, динамическое давление солнечного ветра в этот день было максимальным по сравнению со всеми остальными сеансами наблюдений (Долгинов, Грингауз и др. [16]), и эффекты индукции могли отчетливо проявиться в марсианской «собственной» магнитосфере.

6. Еще одним аргументом против существования «собственной» магнитосферы у Марса, как уже отмечалось, Расселл [24] считал то обстоятельство, что максимальная величина магнитного поля в сеансе измерений на «Марсе-3» 21.I 1972 г. наблюдалась не на наименьшем расстоянии орбиты спутника от планеты. Однако следует подчеркнуть, что если планета имеет дипольное магнитное поле и ее магнитосфера имеет дневные каспы, положение и размеры которых зависят от наклона диполя и расстояния от магнитопаузы до планеты, то перигеи орбиты спутника может оказаться в области влияния дневного каспа (в зоне депрессии магнитного поля), и это может быть причиной, из-за которой максимальное поле будет наблюдаться не в перигеи орбиты. Поскольку перигеи сеанса 21.I 1972 г. спутник «Марс-3» проходил на ареографической широте -40° на дневной стороне планеты [35], отмеченный Расселлом эффект мог быть вполне связан с влиянием дневного каспа магнитосферы Марса.

7. Наконец, для поддержания точки зрения о немагнитосферной природе препятствия у Марса Расселл использует предполагаемое Вайсбергом и др. [58] обнаружение потоков тяжелых ионов в пограничном слое у препятствия и в переходной области за фронтом ударной волны у Марса.

Как показал дополнительный анализ экспериментальных данных, полученных Вайсбергом и др. [13, 58], проведенный в работе Безруких и др. [59], все наблюдавшиеся особенности экспериментальных данных, на которых основаны выводы Вайсберга и др. [13, 58] об обнаружении тяжелых ионов, могут быть объяснены без привлечения предположения о наличии тяжелых ионов в регистрируемой плазме.

Следует подчеркнуть, однако, что принципиальная возможность обмена массой между набегающим потоком солнечного ветра и верхней атмосферой и тяжелые ионы в области обтекания, по-видимому, существуют как у Венеры, так и у Марса, независимо от природы их препятствия из-за контакта области обтекания этих планет с атмосферой и ионосферой у Венеры и в областях каспов у Марса. Этот эффект, по-видимому, имеет место и в районе земных каспов.

Заключение

Выше было показано, что вряду со значительным сходством имеются существенные различия между областями обтекания планет Венеры и Марса солнечным ветром. К таким различиям относятся, в частности, меньшие размеры препятствия у Венеры по сравнению с Марсом, соответственно менее удаленное от планеты положение фронта ударной волны, различные закономерности изменений свойств дневной ионосферы в зависимости от зенитного угла Солнца и др.

Анализ всей совокупности экспериментальных данных позволяет в настоящее время заключить, что у Венеры ионосфера и соответственно индуцированное магнитное поле играют определяющую роль в формировании

ударной волны и картины обтекания планеты солнечным ветром, а у Марса в формировании препятствия, останавливающего сленчный ветер, определяющую роль играет собственное поле планеты.

Авторы искренне благодарят М. И. Веригина и Э. М. Дубянина за полезные дискуссии и Е. Г. Ерошенко за предоставленную возможность воспользоваться некоторыми экспериментальными данными до их опубликования.

Дата поступления
28 августа 1979 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ш. Долгинев, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузов. ДАН СССР, 207, 1296, 1972.
2. Sh. Sh. Dolginov, Ye. G. Eroshenko, L. N. Zhuzgov. J. Geophys. Res., 78, 4779, 1973.
3. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukhikh, T. K. Breus et al. J. Geophys. Res., 78, 5808, 1973.
4. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус и др. Космич. исслед., 12, 585, 1974.
5. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин, А. П. Ремизов. ДАН СССР, 218, 791, 1974.
6. Т. К. Бреус, М. И. Веригин. Космич. исслед., 14, 400, 1976.
7. K. I. Gringauz. Rev. Geophys. and Space Phys., 14, 391, 1976.
8. Sh. Sh. Dolginov, Ye. G. Eroshenko, L. N. Zhuzgov et al. In «Solar - Wind Interaction with the planets Mercury, Venus and Mars», 1976, NASA SP-397, ed. by N. F. Ness, p. 1.
9. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов, Б. Ф. Бородин и др. Космич. исслед., 10, 462, 1972.
10. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов и др. Космич. исслед., 11, 743, 1973.
11. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов. Космич. исслед., 12, 279, 1974.
12. O. L. Vaisberg, A. V. Bogdanov. J. Geophys. Res., 80, 487, 1975.
13. O. L. Vaisberg, A. V. Bogdanov, V. N. Smirnov, S. A. Romanov. In «Solar - Wind interaction with the planets Mercury, Venus and Mars», 1976, NASA SP-397 ed. by N. F. Ness, p. 21.
14. O. L. Vaisberg, V. N. Smirnov, A. N. Omelthenko. Solar - Wind interaction with martian magnetosphere. Preprint ND-252, Sp. Res. Inst. Acad. of Sci., USSR, 1977.
15. O. L. Vaisberg. Mars: plasma environment. Preprint N-D-234, Space Res. Inst. Acad. Sci., USSR, 1976.
16. Sh. Sh. Dolginov, L. N. Zhuzgov, V. A. Sharova et al. Preprint N 19 (193) IZMIRAN USSR.
17. Е. Г. Ерошенко. Космич. исслед., 17, № 2, 1979.
18. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukhikh, T. Gomboshi et al. In «Physics of Solar Planetary Environments», D. J. Williams (ed.), 1976, AGU, Washington D. C., p. 918.
19. К. И. Грингауз, М. И. Веригин, Т. К. Бреус, Т. Гомбоши. ДАН СССР, 232, 1099, 1977.
20. M. I. Verigin, K. I. Gringauz, T. Gomboshi et al. J. Geophys. Res., 83, 3721, 1978.
21. T. K. Breus. Space Sci. Rev., 23, 253, 1979.
22. O. L. Vaisberg, S. A. Romanov, V. N. Smirnov et al. In «Physics of Solar Planetary Environments», D. J. Williams (ed.), AGU Washington, D. C. 1976, p. 904.
23. С. А. Романов, В. Н. Смирнов, О. Л. Вайсберг. Космич. исслед., 16, № 5, 1978.
24. C. T. Russell. Geophys. Res. Let., 5, 81, 1978.
25. C. T. Russell. Geophys. Res. Let., 5, 85, 1978.
26. C. T. Russell. Geophys. Res. Let., 3, 125, 1976.
27. C. T. Russell. Geophys. Res. Let., 3, 1413, 1976.
28. C. T. Russell. Geophys. Res. Let., 4, 387, 1977.
29. C. T. Russell, F. L. Scarf. Mars, the neglected planet: a summary of past deeds and future needs for magnetic and solar wind interaction studies, NASA Conference Publication 2072, 1979, Second International Colloquium on Mars, NASA, p. 71.
30. D. S. Intriligator. Mars in the Solar Wind Implications of a Venus - like Interaction, 1979, NASA Conference Publication 2072, Second International colloquium on Mars, NASA, p. 43.
31. P. A. Cloutier, R. E. Daniell, Jr. An Electrodynamic Model of the Solar Wind Interaction with the ionospheres of Mars and Venus, 1979, preprint, Department of Space Physics and Astronomy Rice University, Houston, Texas, 77001.
32. J. A. Jakobs. Geophys. Res. Let., 6, 213, 1979.
33. E. J. Smith. Mars in the «Solar Wind, Implications of an Earth - Like Interaction», 1979, NASA Conference Publication 2072, Second International Colloquium on Mars, NASA, p. 75, 1979.
34. N. F. Ness. Ann. Rev. Earth Sci., 7, 249, 1979.
35. Sh. Sh. Dolginov. Geophys. Res. Let., 5, 89, 93, 1978.
36. G. S. Ivanov-Kholodny, M. A. Kolosov, N. A. Savick et al. Day-time ionosphere of Venus on data of dual-frequency radio-occultation experiments with satellites Venera-9, 10, XXI COSPAR, Innsbruck, Austria, 1978.
37. C. T. Russell, R. C. Elphic, J. A. Slavin. Science, 203, 4382, 745, 1979.
38. J. Wolf, D. S. Intriligator, J. Mihalov et al. Science, 203, 4382, 750, 1979.

39. C. T. Russell, R. C. Elphic, J. A. Slavin. *Science*, 205, 114, 1979.
40. J. Wolf, D. S. Intriligator et al. *Science*, 205, 116, 1979.
41. В. М. Смирнов, А. М. Омельченко, О. Л. Вайсберг. *Космич. исслед.*, 16, № 6, 864, 1978.
42. V. V. Bezrukhikh, T. K. Breus, M. I. Verigin et al. *Sp. Res. XVI*, Academic Verlag, Berlin, 1976.
43. Э. М. Дубинин, Н. М. Подгорный, Ю. Н. Поганин, С. Н. Школьникова. *Космич. исслед.*, 16, 870, 1978.
44. М. В. Васильев, А. С. Вышлов, М. А. Колосов, Н. А. Савич и др. *Космич. исслед.*, 13, № 1, 48, 1975.
45. М. А. Колосов, Н. А. Савич. *УФН*, 111, № 2, 370, 1973.
46. Г. С. Иванюк-Холодный, А. В. Мухайлов, Н. А. Савич. *УФН*, 111, № 2, 373, 1973.
47. R. H. Chen, T. E. Cravens, A. F. Nagy. *J. Geophys. Res.* 82, 3871, 1978.
48. W. B. Hanson, S. Sanatani, D. R. Zuccaro. *J. Geophys. Res.* 82, 4351, 1977.
49. R. P. Rohrbaugh, J. S. Nisbet, E. Bleuler, J. R. Herman. The effect of energetically produced O_2^+ on the ion temperatures of the martian thermospheres, Preprint Ionosphere Res. Lab., Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 16802.
50. T. E. Cravens, A. F. Nagy, R. H. Chen, A. I. Stewart. *Geophys. Res. Let.*, 5, 613, 1978.
51. С. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Дэвис. *Космич. исслед.*, 7, 747, 1969.
52. С. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жусов. *Космич. исслед.*, 13, 108, 1975.
53. K. I. Gringauz, M. I. Verigin, T. K. Breus, A. P. Remizov. Plasma mantle in the tail of Martian and the Earth magnetosphere, 1977, Report to the IV General Assamb. of IAGA, Seattle, August.
54. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин, А. П. Ремизов. *Космич. исслед.*, 13, 123, 1975.
55. M. B. McElroy et al. *Science*, 194, 1295, 1976.
56. U. Von Zahn, D. Krankowsky, K. Mauersberger, *Science*, 203, 4382, 768, 1979.
57. H. B. Niemann, R. E. Hartle, W. T. Kasprzak et al. *Science*, 203, 4382, 770, 1979.
58. O. L. Vaisberg et al. *Space Res.* 16, Akademie - Verlag, Berlin, 1976, p. 1033.
59. В. В. Безруких, М. И. Веригин, Н. М. Шютте. *Космич. исслед.*, 16, № 3, 1978.