

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВЕСТНИК  
АКАДЕМИИ НАУК  
СССР

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

7

---

МОСКВА · 1968

# ИЗУЧЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ВНЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ ПОМОЩИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Доктор технических наук  
К. И. ГРИНГАУЗ

Наряду с интенсивным изучением плазмы в околоземном космическом пространстве (в ионосфере и магнитосфере Земли) при помощи космических аппаратов проведено большое число экспериментальных исследований плазмы на весьма значительных удалениях от Земли. Эти исследования выполнялись в расположенной между орбитами Венеры и Марса области межпланетного пространства, близкой к плоскости эклиптики. В последнее время началось прямое изучение возмущений потоков солнечной плазмы, создаваемых Венерой и Марсом, и ионосфер обеих планет.

На первом этапе экспериментальных исследований (начало им было положено измерениями на советских станциях серии «Луна» в 1959 г., окончание можно условно отнести к 1965 г.) были выявлены некоторые основные свойства идущих от Солнца потоков плазмы, заполняющих солнечную систему, и измерены их усредненные характеристики (величины потоков и их направленных скоростей). В последние годы все большее внимание уделяется более тонким характеристикам межпланетной плазмы, определяющим ее микроструктуру, таким, как разброс скоростей и углов прихода ионов в потоке плазмы, спектр размеров неоднородностей и т. д.

Стало совершенно ясно, что измерения вектора межпланетного магнитного поля — неотъемлемая часть изучения межпланетной плазмы и что только при совместной обработке данных одновременно проведенных плазменных и магнитных исследований можно получить полное представление о физических процессах в межпланетной плазме, в том числе о различного рода колебаниях и ударных волнах в ней.

Результаты первого этапа исследований кратко сводятся к следующему. Изученная область солнечной системы всегда заполнена «солнечным ветром» — потоками плазмы, которые движутся от Солнца по направлениям, весьма близким радиальным. Величины потоков ионов солнечного ветра в районе орбиты Земли меняются в пределах от  $\sim 2 \cdot 10^7$  до  $\sim 10^9$   $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ , а скорости направленного движения плазмы находятся в пределах от  $\sim 280$  до  $\sim 750$   $\text{км/сек}$ . Изменения этих характеристик могут быть проиллюстрированы образцами энергетических спектров ионов солнечного ветра, полученных при помощи автоматических межпланетных станций (рис. 1). Концентрации заряженных частиц в межпланетном пространстве составляют от долей частицы до  $\sim 40$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ . Достаточно часто встречающимися величинами концентрации ионов солнечного ветра вблизи орбиты Земли следует считать 3—5 частиц в  $1 \text{ см}^3$ .

Скорости солнечного ветра меняются квазипериодично, с длительностью цикла 27 суток, равной периоду вращения Солнца вокруг своей оси, причем величины вариаций скорости солнечного ветра за время одного поворота Солнца могут превышать 100 км/сек. Таким образом, как свидетельствует это обстоятельство, солнечный ветер вращается вместе с Солнцем и эмиссия потоков плазмы с различных участков солнечной короны не одинакова.

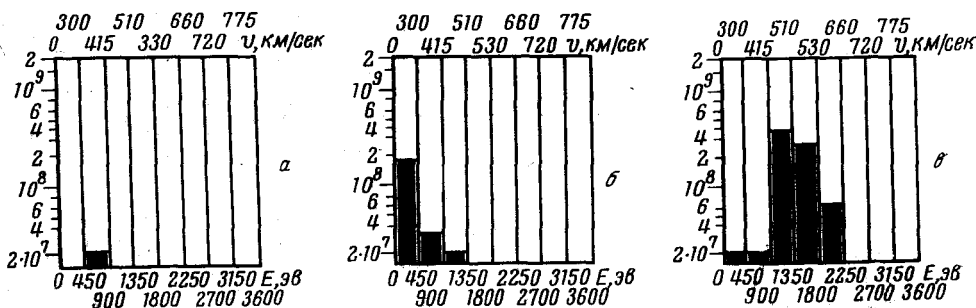


Рис. 1. Образцы энергетических спектров ионов солнечного ветра, полученных в межпланетном пространстве советскими космическими аппаратами на расстояниях миллионов километров от Земли. По оси абсцисс на нижней шкале отложены энергии частиц в эв, на верхней шкале — соответствующие скорости протонов в км/сек; по оси ординат отложен поток частиц в данном энергетическом интервале в частицах через  $1 \text{ см}^2$  в секунду. Спектр (а) получен на АМС «Зонд-2» 5 декабря 1964 г., спектры (б) и (в) на АМС «Венера-3» 16 ноября 1965 г. и 7 января 1966 г. соответственно

Установлено, что, хотя магнитное поле в плазме солнечного ветра непрерывно меняется и по величине и по направлению, после усреднения этих изменений силовые линии межпланетного магнитного поля располагаются по спиралям Архимеда, кривизна которых зависит от скорости солнечного ветра, и у орбиты Земли при его скорости 300 км/сек составляют с направлением на Солнце угол  $45^\circ$ . Для получения этих результатов потребовались приборы, позволяющие производить измерения малых токов, которые создаются заряженными частицами окружающей среды в условиях, резко отличающихся от лабораторных. Так, для изучения потоков ионов солнечного ветра были разработаны ловушки заряженных частиц и электростатические анализаторы, дающие возможность вести измерения при воздействии на них полного спектра коротковолнового излучения Солнца, вызывающего интенсивную фотоэмиссию электронов со всех экспонируемых металлических частей приборов космического аппарата. Были также созданы методы измерения межпланетных магнитных полей, составляющих единицы гамм ( $1 \text{ гамма} = 10^{-5} \text{ э}$ ), несмотря на то, что на космических аппаратах имеются токонесущие провода и другие устройства, обладающие собственными магнитными полями, которые часто превышают по величине поле, подлежащее измерению.

Сейчас, на втором этапе исследований, связанном с изучением микроструктуры солнечного ветра, приходится решать новые проблемы, так как для этого требуются измерительные приборы с более высокими разрешающими способностями по углам прихода частиц и их энергиям, а также космические аппараты, позволяющие быстро менять ориентацию приборов определенным образом и с высокой точностью и передавать на Землю больший объем научной информации.

На американских космических аппаратах «Пионер-6» и «Вела-3» были измерены малые отклонения от радиального течения солнечной плаз-

мы (порядка единиц градусов; в отдельных случаях эти отклонения достигают до  $\sim 10^\circ$ ).

Первые определения температуры ионов или, вернее, квазитемпературы — меры хаотического движения ионов солнечного ветра в системе координат, связанной с потоком плазмы, — проводились при помощи приборов, не позволявших регистрировать различия в движениях ионов в разных направлениях (анизотропию «температуры»). По существу, при этом оценивалась «температура» ионов, усредненная по всем направлениям. Оценки, полученные в разное время и по результатам различных космических аппаратов (в том числе «Венеры-3»), дали значения температуры ионов вблизи орбиты Земли от  $\sim 5 \cdot 10^3$  до  $\sim 3 \cdot 10^5$  град. К. Измерения на аппаратах «Пионер-6» и «Вела-3» говорят о наличии заметной анизотропии ионной «температуры» — вдоль магнитных силовых линий межпланетного поля движение ионов происходит значительно интенсивнее, чем в поперечном направлении; «продольная» температура может быть больше «поперечной» в несколько раз.

Первые опубликованные предварительные данные определения температуры электронов солнечного ветра свидетельствуют о том, что она может в несколько раз превышать ионную температуру.

Проведенный П. Коллманом (США) анализ результатов одновременных измерений характеристик плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля показал, что как в радиальной скорости плазменных потоков, так и в величине магнитного поля имеются синхронные периодические изменения, и привел его к выводу о существовании в межпланетном пространстве магнитогидродинамических волн различной длины.

Общие соображения также указывают на то, что в солнечном ветре должны существовать волны. При вращении Солнца вокруг своей оси менее активные участки его поверхности, эмитирующие плазму в некотором направлении, сменяются более активными, где эмиссия происходит с большей скоростью. Поэтому более быстрые потоки плазмы, которые движутся в данном направлении, нагоняют потоки, покинувшие Солнце ранее, но имевшие меньшую скорость. При взаимодействии намагниченных потоков солнечной плазмы с различными скоростями, в зависимости от разности их скоростей, могут либо образовываться бесстолкновительные ударные волны либо возбуждаться волны разных типов со сравнительно малыми амплитудами. Следует заметить, что к настоящему времени при помощи магнитных и плазменных измерений, проводимых на космических аппаратах, зарегистрировано уже много случаев возникновения бесстолкновительных ударных волн в межпланетном пространстве. Важным источником волн в солнечном ветре могут быть также процессы, происходящие на самом Солнце. Следует ожидать, что в ближайшие годы проблемы, связанные с изучением микроструктуры солнечного ветра, и в частности с определением типов волн, имеющих место в межпланетной плазме, и их частотного спектра, будут в значительной степени решены.

При помощи плазменных и магнитных измерений на спутниках Земли с сильно вытянутыми орбитами несколько лет назад было установлено, что при взаимодействии потоков солнечной плазмы и геомагнитного поля образуется бесстолкновительная ударная волна, наименьшее расстояние которой от Земли (в направлении Земли — Солнце) составляет примерно 50—80 тыс. км. Это расстояние определяется соотношением между энергией потока солнечного ветра и величиной магнитного поля Земли.

За фронтом ударной волны (ближе к Земле) расположена переходная зона, в которой плазма по своим свойствам сильно отличается от невозмущенного солнечного ветра — магнитное поле быстро флуктуирует по направлению и величине, направленная скорость заряженных частиц силь-

но падает, а хаотические скорости возрастают и т. д. Физические характеристики этой возмущенной зоны вблизи Земли довольно хорошо изучены.

Можно было ожидать, что если Венера обладает заметным собственным магнитным полем  $H_B$ , то и вблизи нее со стороны Солнца на расстоянии, определяемом величиной  $H_B$ , в солнечном ветре образуется ударная волна. Как показали результаты экспериментов, проведенных на советской меж-

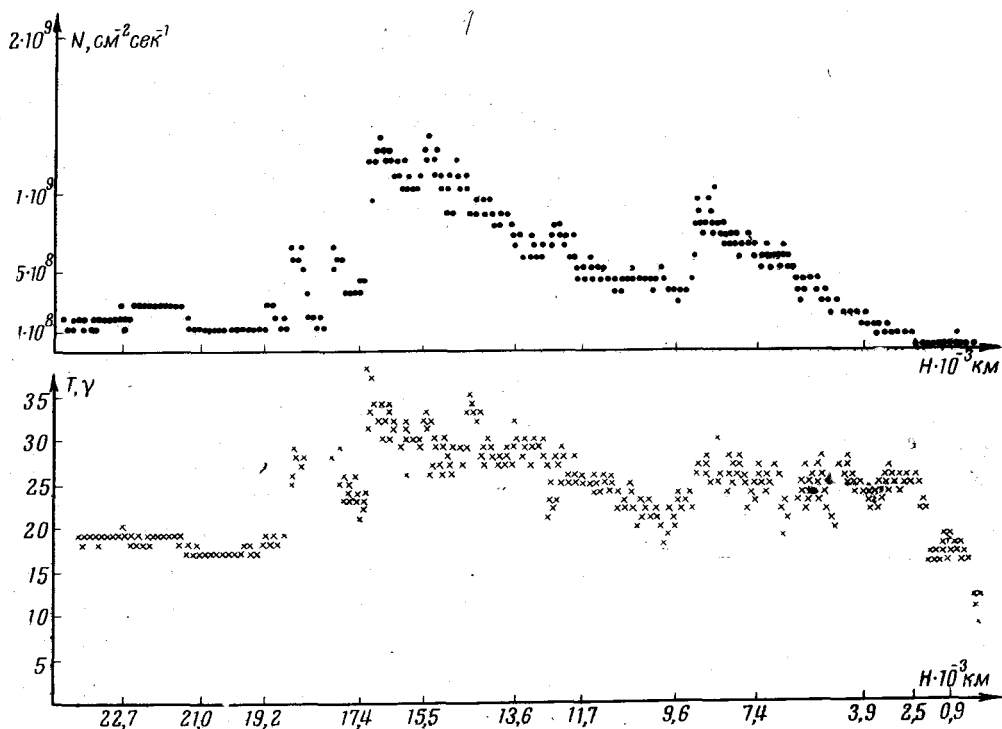


Рис. 2. Изменения потоков ионов солнечной плазмы (верхний график) и напряженности магнитного поля (нижний график) вдоль траектории «Венера-4» на припланетном участке полета в зависимости от расстояния до поверхности планеты

планетной станции «Венера-4», которая достигла планеты 18 октября 1967 г., и подтвержденных данными американского аппарата «Маринер-5», который пролетел мимо Венеры 19 октября 1967 г., магнитное поле Венеры отсутствует или настолько мало, что не поддается измерению. Однако вблизи планеты в солнечном ветре обнаружена ударная волна.

В верхней части рис. 2 приведены результаты определений потоков ионов солнечного ветра  $N_i$  вблизи планеты, выполненных при помощи ловушек заряженных частиц на «Венере-4» (В. В. Безруких, Т. К. Бреус, Л. С. Мусатов и автор настоящей статьи). По оси абсцисс отложены высоты над поверхностью Венеры. В нижней части рисунка показаны результаты одновременных измерений напряженности магнитного поля вблизи планеты (Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко и Л. Н. Жузгов). Из рисунка видно, что примерно на высоте 19 000 км начинается существенное возрастание как потоков  $N_i$  солнечной плазмы, так и величины напряженности магнитного поля  $T$ , причем их изменения происходят в значительной степени синхронно.

На рис. 3, плоскость которого совпадает с плоскостью траектории «Венера-4», изображено положение фронта ударной волны в межпланетной



плазме вблизи Венеры (по расчетам авторов плазменного эксперимента на «Венере-4»). Пересечение показанного на этом рисунке фронта ударной волны траекторией «Венеры-4» происходит на высоте, близкой к той, на которой началось возрастание  $N_i$  и  $T$  на рис. 2. Наименьшее расстояние фронта ударной волны от планеты  $\sim 2000$  км (в направлении Венеры — Солнце). Подобная ударная волна в практически лишенной столкно-

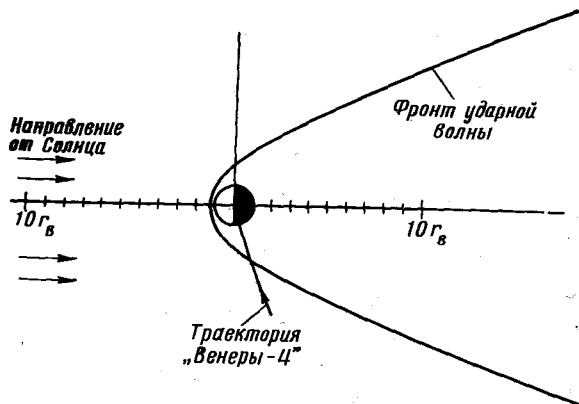


Рис. 3. Пересечение траекторией автоматической станции «Венера-4» фронта ударной волны, образованной солнечным ветром около планеты Венера. Положение фронта ударной волны рассчитано для скорости солнечного ветра  $V = 350$  км/сек и напряженности межпланетного магнитного поля  $H = 7\gamma$

вений плазме солнечного ветра может образоваться вблизи планеты, не имеющей магнитного поля, вследствие того, что циклотронный радиус ионов, определяемый межпланетным магнитным полем, много меньше размеров планеты, и в случае, если вблизи от поверхности планеты имеется оболочка с хорошей электропроводностью. Такой оболочкой может служить поверхность металлического ядра планеты (согласно гипотезе авторов плазменного эксперимента на «Венере-4»), или дневная часть ионосферы Венеры (согласно предположению авторов экспериментов на «Маринере-5»).

В заключение остановимся на прямых исследованиях ионосфер Луны, Марса и Венеры.

Первые экспериментальные результаты, относящиеся к ионосфере Марса, были получены в 1964 г. группой сотрудников Стэнфордского университета (США) при помощи космического аппарата «Маринер-4». Эксперимент состоял в приеме на борту аппарата двух излучаемых с Земли когерентных радиоволн (с частотами  $\sim 50$  и  $\sim 450$  мГц), регистрации их разности фаз и телеметрической передаче ее величины на Землю. Анализ результатов этих измерений, выполненных при прохождении радиоволн в марсианской ионосфере, привел авторов к выводу о наличии в ней на высоте  $\sim 125$  км отчетливого максимума электронной концентрации  $n_e \sim 10^5$  в  $1$  см<sup>3</sup>.

Первые прямые плазменные эксперименты вблизи Луны, проведенные в 1966 г. при помощи ловушек заряженных частиц на первом искусственном спутнике Луны — советской автоматической станции «Луна-10», позволили назвать в качестве верхнего предела ионной концентрации в ионосфере Луны величину 100 ионов в  $1$  см<sup>3</sup>, что соответствует оценкам максимальной электронной концентрации в лунной ионосфере, полученным ранее радиоастрономическим методом.

В течение ряда лет многие авторы высказывали соображения, на основании которых делался вывод о том, что концентрация заряженных частиц в ионосфере Венеры существенно больше, чем в ионосфере Земли. Согласно некоторым оценкам, в ионосфере Венеры она может достигать  $10^9 \text{ см}^{-3}$ , что на три порядка выше максимальной концентрации заряженных частиц в земной ионосфере. Однако измерения концентрации ионов  $N_1$ , выполненные 18 октября 1967 г. вблизи Венеры при помощи ловушек заряженных частиц на АМС «Венера-4», показали, что на высотах в несколько сотен километров  $N_1$  не превышает  $10^3 \text{ см}^{-3}$ , т. е. существенно ниже, чем в ночной ионосфере Земли на соответствующих высотах. Следует иметь в виду, что весь припланетный участок траектории «Венеры-4» проходил над неосвещенной частью поверхности планеты; спускаемый аппарат опустился на ночной стороне планеты, вблизи границы ночи и утра.

Этот результат оказался неожиданным.

При помощи «Маринера-5» 19 октября 1967 г. был осуществлен эксперимент по изучению прохождения радиоволн в ионосфере Венеры во время пролета аппарата мимо планеты и «затмения» его Венерой. Методика была аналогична применявшейся на «Маринере-4». После предварительной обработки данных этого эксперимента, проведенного упоминавшейся Стэнфордской группой, авторы пришли к заключению, что ночная ионосфера Венеры на высотах более 300 км имеет электронную концентрацию  $n_e$  менее  $10^3 \text{ см}^{-3}$ , на высоте  $\sim 200 \text{ км}$   $n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Эти величины (так же, как и полученные «Венерой-4») существенно ниже, чем  $n_e$  в ночной ионосфере Земли.

Согласно выводам Стэнфордской группы, в дневной ионосфере Венеры максимальное значение  $n_e$  имеет место на высоте  $\sim 200 \text{ км}$  и равно  $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Это означает, что днем  $n_e$  в ионосфере Венеры значительно ближе к  $n_e$  в земной ионосфере, чем ночью.

Указанные величины концентрации заряженных частиц в ионосфере Венеры и их высотное распределение не противоречат картине холодной верхней атмосферы с малой протяженностью, которая может быть построена на основе прямых исследований нейтральной атмосферы планеты, выполненных при помощи «Венеры-4». Однако вопрос о степени соответствия результатов изучения нейтральной и ионизированных составляющих атмосферы Венеры выходит за рамки этой статьи.