

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Трунцев

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XIV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

6

МОСКВА · 1976

*К. И. Грингуз, В. В. Безруких, Т. К. Брюс,
М. И. Веригин, Г. И. Волков, Т. Гомбони¹,
А. И. Ремизов*

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОМОЩИ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА СПУТНИКАХ «ВЕНЕРА-9» И «ВЕНЕРА-10»

На космических аппаратах «Венера-9» и «Венера-10», выведенных на орбиты спутников Венеры в октябре 1975 г., при помощи широкоугольных датчиков проводились измерения малоэнергичной плазмы. Период обращения спутников составлял ~2 суток, высота орбиты в перигентре ~1500 км, в апоцентре ~110 000 км, наклонение ~30°. На «Венере-9» ионная компонента плазмы измерялась в 16 энергетических интервалах (в диапазоне энергий 0÷4400 эв) при помощи ориентированной на Солнце модуляционной ловушки с угловой диаграммой направленности $\pm 45^\circ$; измерения электронной компоненты плазмы проводились при помощи ориентированной в антисолнечном направлении интегральной ловушки (с угловой диаграммой $\pm 40^\circ$), на анализирующие сетки которой подавались 16 значений тормозящего напряжения в диапазоне 0÷300 в. На «Венере-10» измерялась только электронная компонента плазмы, так как усилитель тока ионной ловушки вышел из строя на трассе перелета. Используемая аппаратура незначительно отличается (датчики идентичны) от приборов, ранее работавших в плазменных экспериментах в окрестности Марса на спутниках «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5» и более подробно описанных в [1].

До полета спутников «Венера-9» и «Венера-10» экспериментальные результаты, относящиеся к области взаимодействия солнечного ветра с Венерой, были отрывочны. Впервые одновременные возмущения ионной компоненты межпланетной плазмы и магнитного поля, связанные с околопланетной ударной волной, были обнаружены 18.X 1967 г. при подлете станции «Венера-4» к Венере [2, 3]. Позже пересечения фронта околопланетной ударной волны регистрировались 19.X 1967 г. на «Маринере-5» [4], 17.V 1969 г. на «Венере-6» [5] и 5.II 1974 г. на «Маринере-10» [6, 7]. Измерения ионной компоненты малоэнергичной плазмы на «Венере-4» и «Венере-6» проводились при помощи широкоугольных ловушек при двух значениях тормозящего потенциала 0 и +50 в [2, 5], на «Маринере-5» при помощи модуляционной ловушки в диапазоне энергий 40÷9400 эв также измерялась только ионная компонента плазмы [4], а на «Маринере-10» были проведены измерения только электронной компоненты плазмы в диапазоне энергий 13÷715 эв при помощи ориентированного в основном в антисолнечном направлении электростатического анализатора [6]. Таким образом, до полета «Венеры-9» одновременные измерения электронной и ионной компонент плазмы в области взаимодействия солнечного ветра с Венерой не проводились. Следует отметить также полное отсутствие экспериментальных данных о характеристиках плазмы в оптической тени планеты.

¹ Сотрудник ЦИФИ АН ВНР, Будапешт, Венгрия.

Положение фронта ударной волны было достаточно уверенно определено в предыдущих экспериментах на «Венере-4», «Маринере-5», «Венере-6» [2-5] только при больших углах Солнце — Венера — КА φ (112, 138, 129° соответственно), когда относительная неопределенность положения фронта была достаточно мала: $\Delta r/r \ll 1$, где r — расстояние от центра Венеры до фронта и Δr — неопределенность положения фронта, связанная с характером движения и толщиной фронта, а также с частотой плазменных или магнитных измерений в каждом конкретном эксперименте. Как отмечалось в [8], по данным «Маринера-5» и «Маринера-10», для зарегистрированных на этих аппаратах пересечений фронта на выходе из переходной области при меньших r и φ , Δr составляла 3000 км и была сравнима с размерами препятствия, создающего фронт ($\Delta r/r \approx 0,2 \div 0,3$).

Ранее была опубликована заметка [9], содержащая первые предварительные данные, полученные 26.X 1975 г. при пролете «Венеры-9» из оптической тени Венеры в солнечный ветер. В настоящее время частично обработаны результаты измерений, выполненных на 16 околопланетных участках орбит, относящихся к первому месяцу работы спутников (12 пролетов «Венеры-9» и 4 пролета «Венеры-10»). Ниже рассматриваются и обсуждаются некоторые результаты измерений, выполненных на этих пролетах.

1. Корпускулярная и оптическая тень, корпускулярная полутень. Плазменные измерения в режимах с повышенной опросностью начинались, как правило, в оптической тени планеты на высотах $\sim 1,5 \div 2$ тыс. км на расстоянии $3 \div 4$ тыс. км от линии Солнце — Венера. В этом режиме один раз в секунду измерялось по одному значению токов электронной и ионной ловушки. Так как измерения ионной компоненты плазмы проводились в 16 энергетических интервалах, измерения электронной компоненты при 16 значениях тормозящего напряжения, а в каждом энергетическом интервале и при каждом значении тормозящего напряжения ток измерялся 10 раз, то полный дифференциальный энергетический спектр ионов и интегральный энергетический спектр электронов получались за 160 сек. За это время спутники при скорости ~ 7 км/сек пролетали ~ 1100 км, что необходимо учитывать в областях с большими градиентами свойства окружающей плазмы.

На рис. 1 в координатах $X, \sqrt{Y^2 + Z^2}$ (ось X проходит через центр планеты и направлена на Солнце) приведен отрезок траектории «Венеры-9» при пролете из оптической тени в солнечный ветер 1.XI 1975 г. В верхней части рисунка приводятся энергетические спектры электронов и ионов, полученные в этом пролете. В оптической тени планеты регулярно измерялись энергетические спектры электронов, соответствующие концентрации электронов $n_e \sim 1$ см⁻³ и температуре $T_e \approx (2 \div 5) \cdot 10^5$ °К. В этой же области в среднем в $\sim 70\%$ телеметрических опросов измеренные потоки ионов оказывались ниже пределов чувствительности приборов, а в $\sim 30\%$ случаев регистрировались флуктуирующие по величине потоки ионов, беспорядочно распределенные по всем энергетическим интервалам до 4,4 кэВ. Плазма со свойствами, характерными для оптической тени планеты, регистрировалась и на несколько сот километров выше границы оптической тени. Область, более широкую чем область оптической тени планеты, характеризующуюся отсутствием четко выраженных направленных потоков ионов, мы будем называть областью корпускулярной тени. На рис. 1 приведены спектры (а) электронов и ионов в области корпускулярной (и оптической) тени. Основная масса отсчетов в ионном спектре лежит ниже чувствительности прибора, точками показаны отдельные выбросы регистрируемых ионных токов.

Между корпускулярной тенью и переходной областью, существующей за фронтом околопланетной ударной волны, наблюдалась зона, названная нами «корпускулярной полутенью» (спектры б на рис. 1), внутри которой ионная компонента плазмы характеризуется меньшими переносными скоростями по сравнению с переходной областью (спектры в на рис. 1); на-

правленный характер движения ионов в корпускулярной полутени выражен вполне отчетливо.

Рассмотрим выход из корпускулярной тени более подробно. На рис. 2 приведены пять последовательных ионных спектров, зарегистрированных 30.X 1975 г. на спутнике «Венера-9» при его пролете из корпускулярной тени в переходную область. Как отмечалось выше, в каждом энергетическом интервале ток регистрировался 10 раз (при отсутствии «сбоев»), однако из-за переходного процесса при подаче высокого и модулирующего напряжения на сетку ионной ловушки даже в спокойной окружающей плазме

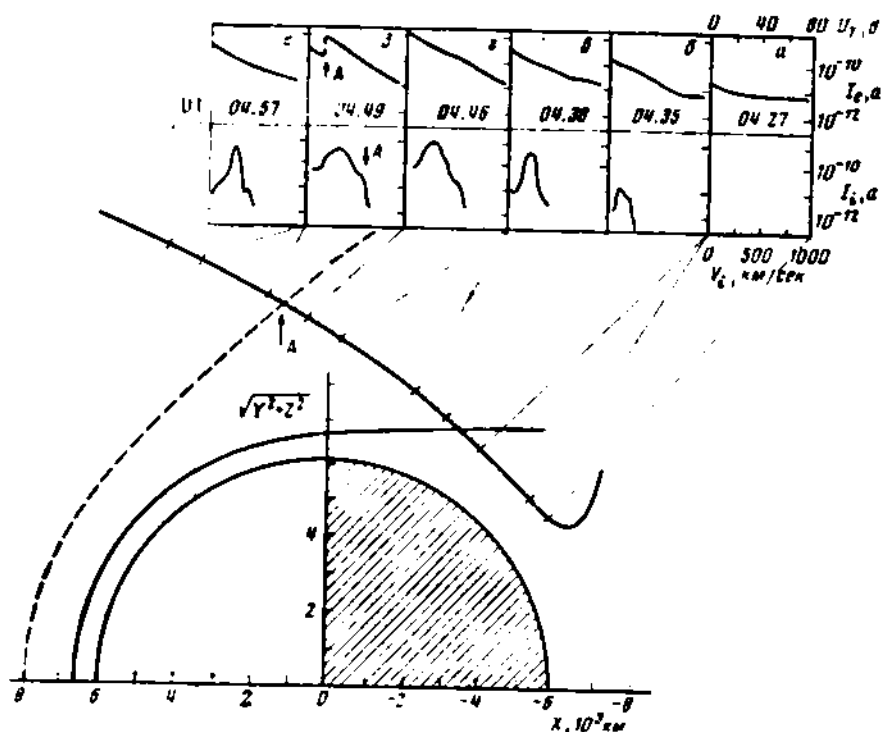


Рис. 1. Околопланетный участок траектории «Венеры-9» 1.XI 1975 г. и полученные в этом пролете энергетические спектры ионов и электронов

A — положение спутника при пересечении фронта ударной волны (штриховая линия), проведенного в соответствии с расчетами работы [10] для $H_r = 0,01$. Сплошная линия — положение препятствия, соответствующего этому фронту

первый отсчет тока, как правило, отличался от остальных. Поэтому на рис. 2 в каждом энергетическом интервале приведено девять отсчетов ионного тока (в первом энергетическом интервале 0-40 эВ приведены последние пять отсчетов тока). Как видно на рис. 2, направленный характер потоков ионов, стал заметен на спектре z , когда спутник вышел в полутень (согласно нашей терминологии).

Для оценки параметров плазмы в полутени, переходной области и солнечном ветре использовались усредненные (по девяти отсчетам) значения токов в каждом энергетическом интервале. На рис. 2, z , δ сплошной линией показаны рассчитанные на ЭВМ значения токов в наших энергетических интервалах при следующих параметрах окружающей плазмы (выбранных так, чтобы взвешенное среднеквадратичное отклонение расчетных токов от усредненных измеренных токов было наименьшим): в полутени — концентрация ионов $n_i \approx 1,5 \text{ см}^{-3}$, переносная скорость $V \approx 180 \text{ км/сек}$, температура $T_i \approx 5 \cdot 10^4 \text{ K}$; в переходной области $n_i \approx 2,7 \text{ см}^{-3}$, $V \approx 240 \text{ км/сек}$, $T_i \approx 5,3 \cdot 10^4 \text{ K}$, т. е. при выходе в переходную область из по-

лутени 30.X 1975 г. произошло увеличение переносной скорости и концентрации ионов, их температура практически не изменилась. Немонотонное изменение рассчитанных токов (рис. 1, δ) объясняется выбранным изменением относительной ширины энергетических ступеней. Отклонение вектора переносной скорости ионов от нормали к апертуре ловушки при расчете не учитывалось. Аналогичные оценки параметров ионной компоненты плазмы 1.XI в полутени (спектр δ на рис. 1) дают $n_i \approx 2,9 \text{ см}^{-3}$, $V \approx 110 \text{ км/сек}$, $T_i \approx 3 \cdot 10^4 \text{ К}$; в переходной области (спектр ϵ на рис. 1) $n_i \approx 13 \text{ см}^{-3}$, $V \approx 230 \text{ км/сек}$, $T_i \approx 0,9 \cdot 10^4 \text{ К}$. В этом пролете также происходит увеличение переносной скорости и концентрации ионов в переходной обла-

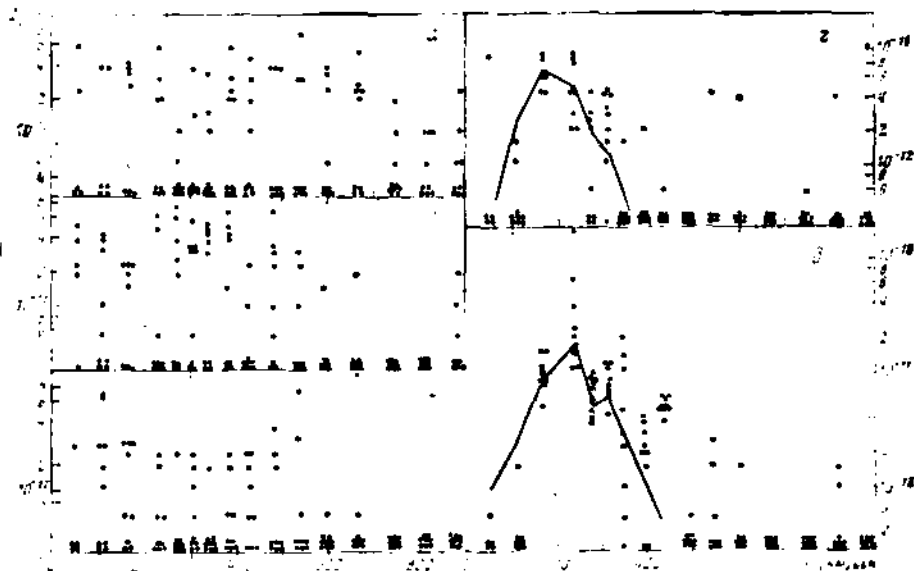


Рис. 2. Ионные спектры, зарегистрированные 30.X 1975 г. на «Венера-9» при его пролете из корпускулярной тени (а, б, в) через корпускулярную полутень (г) и переходную область (д)

Начало измерения спектров (UT) $t_{a1} = 04.08.27$, $t_{a2} = 04.11.07$, $t_{a3} = 04.13.17$, $t_{a4} = 04.16.27$, $t_{d1} = 04.19.07$

сти, однако температура их уменьшается. Меньшие значения температуры ионов, оцененных по спектру ϵ (рис. 1), по сравнению с T_i в полутени, могут быть вызваны временными изменениями токов, регистрируемых ловушкой при снятии этого спектра. Действительно, для последующих спектров в переходной области 1.XI оценки T_i лежали в пределах $(2,6 \div 3,4) \cdot 10^4 \text{ К}$, т. е. и в этом пролете при выходе из полутени в переходную область температура ионов, по-видимому, существенно не изменилась.

Отметим, что корпускулярная полутень регистрируется не при всех пролетах спутника. Это может быть связано с тем, что характерный размер полутени порядка расстояния, на котором в данном эксперименте снимается полный энергетический спектр ионов, и при пролете спутника через корпускулярную полутень измерения могут проводиться в тех энергетических интервалах, в которых потоки ионов в полутени отсутствуют.

2. Переходная область и околопланетная ударная волна. Вернемся к рассмотрению рис. 1. После выхода из корпускулярной полутени спутник на протяжении $\sim 5000 \text{ км}$ летел в переходной зоне. Это перемещение сопровождается монотонным возрастанием потоков электронов при всех потенциалах торможения (ср. электронные спектры ϵ и ζ на рис. 1), переносная скорость ионов увеличивается с 230 до 270 км/сек, концентрация плаз-

мы (определенная по показаниям ионной ловушки) возрастает от 13 до 105 см^{-3} . Во время снятия спектра ∂ (рис. 1) спутник пересекал фронт ударной волны A и выходил в солнечный ветер (спектр ϵ). В приведенном на рис. 1 сеансе измерений пересечение фронта A отчетливо видно как достаточно резкое падение регистрируемых потоков электронов (измерения ионной компоненты в это время проводилось в энергетических интервалах, где потоки ионов как в переходной области, так и в солнечном ветре практически отсутствовали). В солнечном ветре в этом сеансе измерений концентрация была $n \approx 35 \text{ см}^{-3}$, $T_1 \approx 6,5 \cdot 10^4 \text{ K}$, $T_2 \approx 150 \cdot 10^4 \text{ K}$, $V \approx 310 \text{ км/сек}$.

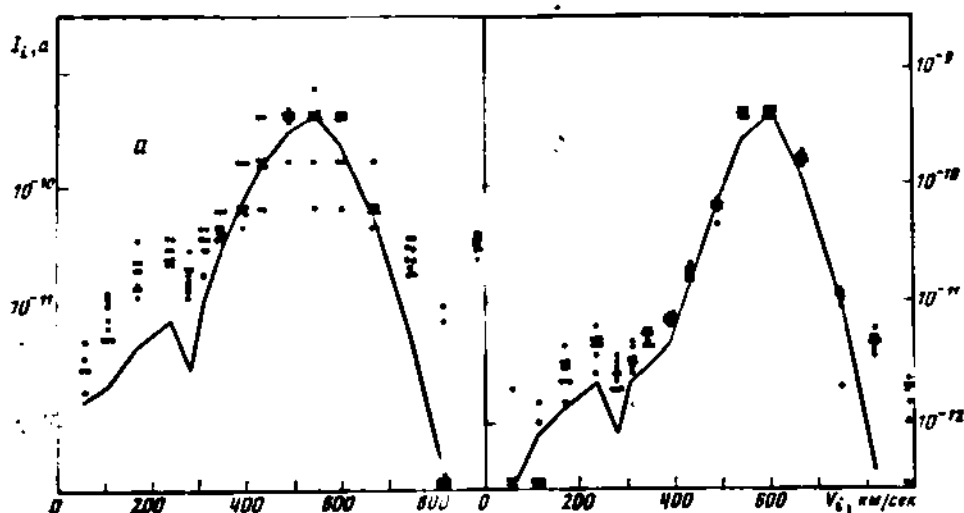


Рис. 3. Ионные спектры, полученные 9.XI 1975 г. на «Венере-9» в переходной области (а) и в солнечном ветре (б)

Начало измерений спектров t_0 : $t_{0a} = 06.06.51 \text{ UT}$, $t_{0b} = 06.21.51 \text{ UT}$. Сплошная ломаная линия на спектре а — расчетные значения токов при $n_0 \approx 22 \text{ см}^{-3}$, $T_1 \approx 6,2 \cdot 10^4 \text{ K}$, $V \approx 520 \text{ км/сек}$; на спектре б — при $n_0 \approx 12 \text{ см}^{-3}$, $T_1 \approx 4,1 \cdot 10^4 \text{ K}$, $V \approx 500 \text{ км/сек}$.

Отметим, что более крутой спад с увеличением тормозящего напряжения регистрируемых потоков электронов в переходной зоне, по сравнению с солнечным ветром (ср. электронные спектры ϵ и δ на рис. 1), по-видимому, может быть объяснен не «охлаждением» электронов за фронтом ударной волны, а тем, что за время снятия полного энергетического спектра электронов (от больших тормозящих потенциалов к малым) концентрация плазмы из-за движения спутника существенно возрастает (в ~ 2 раза), что приводит при обработке к занижению температуры электронов в переходной области, формально определенной по «энергетическому» спектру, и к завышению их «концентрации» по сравнению с концентрацией ионов.

На рис. 3 приведены ионные спектры, полученные в сеансе измерений 9.XI 1975 г. на «Венере-9» в переходной области (рис. 3, а) и в солнечном ветре (рис. 3, б). Как видно из рисунка, ионная компонента плазмы в переходной области за фронтом ударной волны не только тормозится и разогревается по сравнению с ионной компонентой солнечного ветра, но и характеризуется существенно большими флуктуациями ионных потоков в энергетических интервалах с наибольшими регистрируемыми потоками. В условиях сильно флуктуирующих потоков заряженных частиц для адекватного описания состояния плазмы необходимо учитывать уровень флуктуаций и используемый нами описанный выше способ определения параметров плазмы, по-видимому, не позволяет получать надежные численные результаты.

Поведение оцененных указанным образом параметров ионной и электронной компонент плазмы при пересечении «Венерой-9» фронта околопланетной ударной волны 11.XI 1975 г. приведено на рис. 4. Отчетливо видно уменьшение концентрации n и увеличение переносной скорости V плазмы,

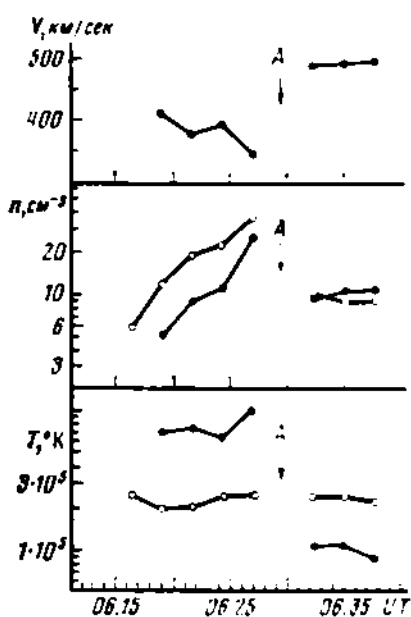


Рис. 4. Поведение оцененных параметров ионной (точки) и электронной (кружки) компонент при пересечении «Венерой-9» фронта околопланетной ударной волны А 11.XI 1975 г.

Оценки сделаны без учета изменения концентрации плазмы за время снятия одного спектра

ударной волны. При пересечении фронта ударной волны на различных оборотах спутников наблюдались существенно отличающиеся друг от друга структуры фронтов. Ранее в [9] были приведены результаты измерений электронной и ионной компонент плазмы при пересечении фронта ударной волны «Венерой-9» 26.X 1975 г. В этом сеансе измерений пересечение фронта зарегистрировано одновременно электронным и ионным датчиками как уменьшение токов за период времени в 1–2 сек, что с учетом скорости спутника и в предположении, что фронт не двигался, позволяет оценить его толщину в 10–15 км [9]. Разумеется, нельзя исключить, что в этом сеансе измерений (как и в рассматриваемых ниже) могло происходить перемещение фронта со скоростью, существенно превышающей скорость спутника (~ 7 км/сек); в этом случае оценка толщины фронта должна увеличиться.

На рис. 5 приведены три последовательных электронных интегральных энергетических спектра, зарегистрированных 2.XI 1975 г. на «Венере-10» при пролете на переходной области (спектр а) в солнечный ветер (спектр б). На спектре б буквой А отмечен интервал времени ~ 20 сек, соответствующий пересечению спутником фронта ударной волны. Как видно из рисунка, поток электронов в интервале времени А уменьшался достаточно монотонно и толщину фронта ударной волны в этом случае можно оценить в ~ 150 км, снова предположив, что фронт ударной волны не перемещался.

Следует отметить, что в некоторых из обработанных сеансов измерений, по-видимому, наблюдались перемещения фронта ударной волны. Например, на рис. 6 показаны электронные и ионные спектры, полученные

а также уменьшение температуры ионов при пересечении фронта ударной волны А и выходе в солнечный ветер. Отметим, что приведенные на рис. 4 оценки температуры и концентрации электронов сделаны без учета изменения концентрации плазмы в переходной области за время измерения одного энергетического спектра (см. выше). Следствием этого является, по-видимому, превышение концентрации электронов в переходной области над концентрацией ионов и отсутствие существенного изменения температуры электронов на фронте ударной волны (см. рис. 4). Учет градиента концентрации плазмы в переходной области приведет к большому согласию оценок концентраций электронов и ионов в переходной области, а также к заключению о некотором уменьшении температуры электронов при пересечении фронта ударной волны и выходе в солнечный ветер 11.XI.

Достаточно высокое временное разрешение приборов, установленных на «Венере-9» и «Венере-10», позволяет подробно изучить поведение электронной и ионной компонент плазмы при пересечении фронта околопланетной

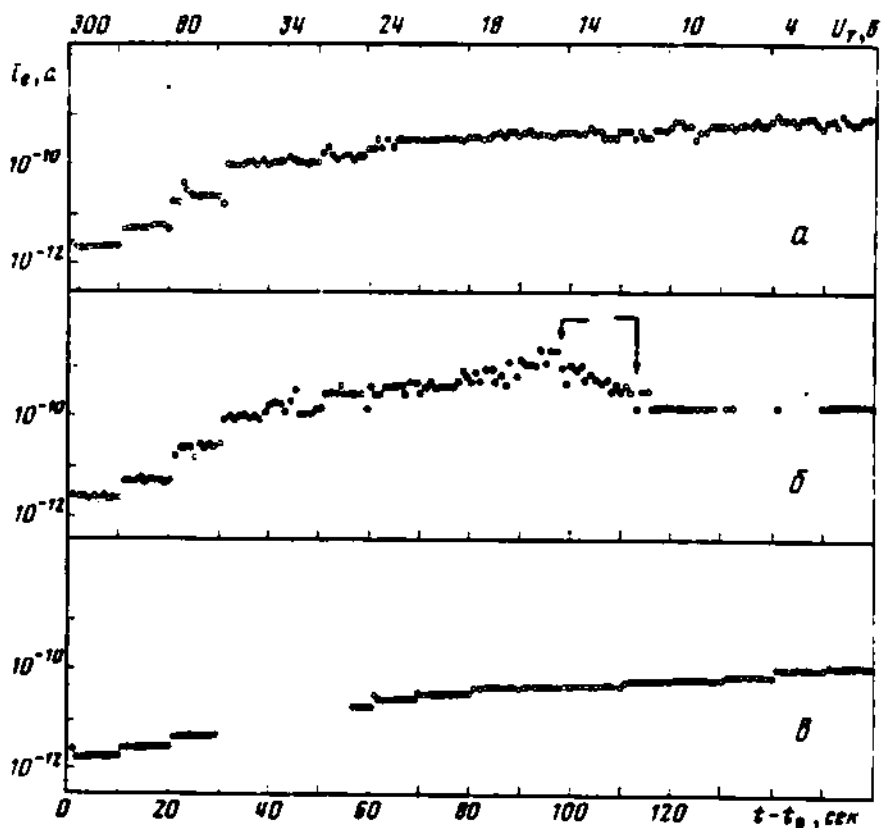


Рис. 5. Энергетические электронные спектры, зарегистрированные 2.XI 1975 г. на «Венере-10» при пролете из переходной области (а) в солнечный ветер (а)

А — пересечение спутником фронта околопланетной ударной волны. Начало измерения спектров t_0 : $t_{0a} = 08.51.38$ UT, $t_{0б} = 08.54.18$ UT, $t_{0в} = 08.56.36$ UT. U_T — тормозящее напряжение на анализирующей сетке ловушки

при выходе «Венеры-9» 11.XI 1975 г. (спектры б) на переходной области в солнечный ветер. В интервале времени, отмеченном штриховой линией на спектрах б, наблюдались значительные и быстрые колебания потоков ионов и электронов, которые можно интерпретировать как колебательные движения фронта ударной волны в направлении движения спутника со скоростями, в 10–20 раз превышающими скорость спутника, либо как «пульсирующий» фронт протяженностью $\sim 200 \div 300$ км. Перемещение фронта на более значительное расстояние наблюдалось 9.XI 1975 г., когда «Венера-9» пересекла фронт околопланетной ударной волны в точках, разнесенных в пространстве на расстояние ~ 1000 км. Отметим также, что в одном из пролетов («Венера-9» 7.XI) наблюдался весьма широкий фронт, на котором переход от спектров заряженных частиц, типичных для солнечного ветра, к типичным для переходной области спектрам, происходил на участке орбиты длиной ~ 3000 км.

На рис. 7 показаны проанализированные случаи пересечения «Венеры-9» (кружки) и «Венеры-10» (точки) фронта околовенерианской ударной волны. Сплошной чертой с кружком отмечены пересечения фронта ударной волны 7.XI и 9.XI 1975 г., когда неопределенность положения фронта составляла ~ 3000 и 1000 км соответственно. Штриховой кривой показано положение фронта ударной волны, рассчитанное в работе [10] для препятствия, характеризующегося параметром $H/r_0 = 0,01$ и высотой лобовой точки над поверхностью Венеры 500 км (сплошная линия). Отрезками кривых показаны участки орбиты «Венеры-9», на которых наблюда-

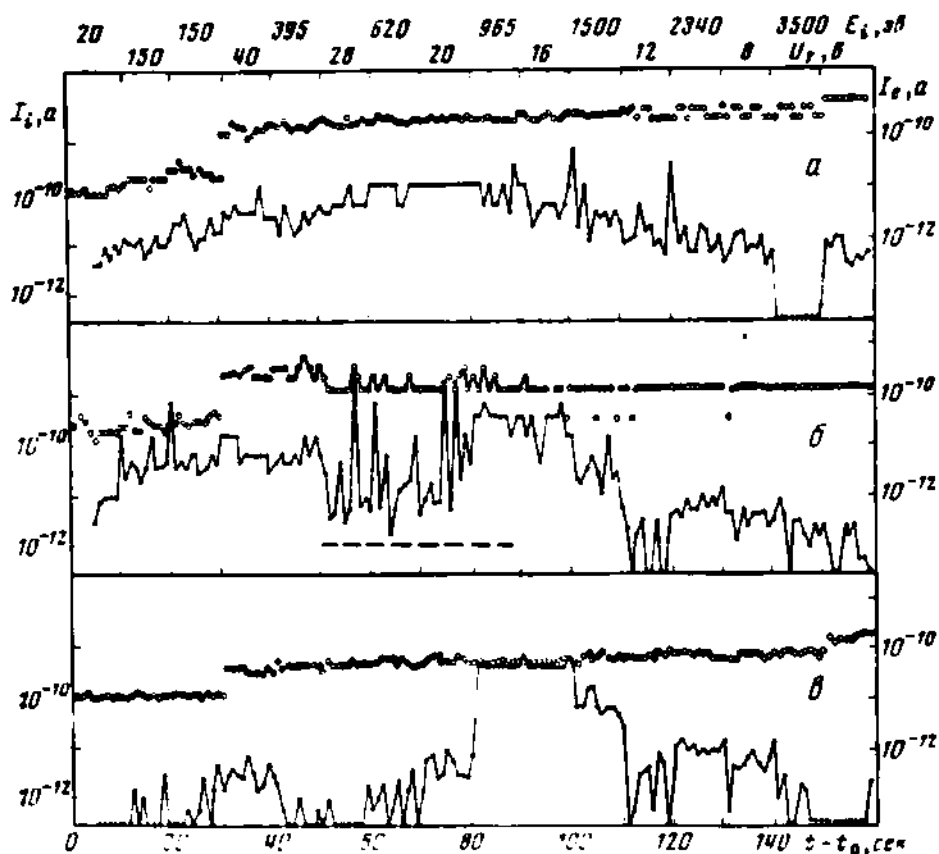


Рис. 6. Энергетические электронные (кружки) и шумные (точки) спектры, зарегистрированные 11.XI 1975 г. на «Венере-9» при пролете на переходной области (а) в солнечный ветер (а)

Начало измерения спектров I_e : $t_{a0} = 06.25.40$ UT, $t_{б0} = 06.28.20$ UT, $t_{в0} = 06.31.00$ UT. U_T — тормозящее напряжение на анализирующей сетке электронной ленточки. E_i — энергия, соответствующая середине энергетических интервалов для шумной ленточки

лись шумные спектры, характерные для корпускулярной полутени. Как видно из рисунка, при выбранных выше размерах и форме препятствия наблюдаемые положения корпускулярной полутени и фронта околосолнечной ударной волны находятся в разумном согласии с расчетными.

3. Обсуждение. А. Области корпускулярной тени и полутени. Одним из неожиданных, непонятных и поэтому наиболее интересных результатов описываемых измерений является обнаружение потоков ионов с энергиями в интервале $\sim 1 \div 4,4$ кэВ в глубокой оптической и корпускулярной тени планеты. Как отмечалось и как видно из рис. 2, при некоторых пролетах такие потоки регистрируются примерно в 30% случаев (в $\sim 70\%$ общего числа измерений эти потоки ниже уровня чувствительности приборов). Однако потоки ионов в указанном интервале энергий не регистрируются на участках траектории, расположенных в корпускулярной тени ближе к переходной области, в корпускулярной полутени и в самой глубокой части переходной области (ср. спектры а и в, з, д на рис. 2).

Характерный размер корпускулярной полутени ~ 1000 км (см. рис. 1, 7) качественно согласуется с тем, что она может быть образована в результате размыва первоначально достаточно резкой границы препятствия (естественной толщиной границы препятствия в окрестности терминатора является шкала высот пониженой или нейтральной части атмосферы

Венеры) из-за теплового движения заряженных частиц плазмы или неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца на границе препятствия. Однако эти механизмы могут объяснить проникновение плазмы глубоко в оптическую тень за Венерой, но не объясняют существования в ней потоков ионов с энергиями, не наблюдаемыми в окрестности корпускулярной полутени, и, по-видимому, необходимо предположить наличие процессов ускорения ионов глубоко внутри корпускулярной тени планеты. Косвенным свидетельством в пользу того, что по крайней мере некоторые механизмы ускорения являются стохастическими может быть наличие больших флуктуаций потоков ионов глубоко в корпускулярной тени планеты.

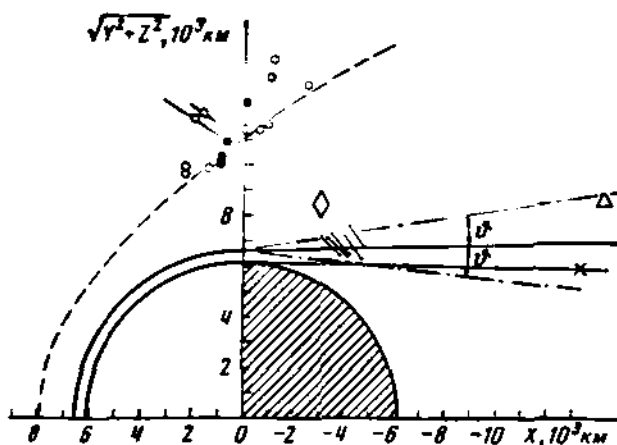


Рис. 7. Пересечение фронта ударной волны «Венерой-9» (кружки) и «Венерой-10» (точки)

Прямая с крестиком — положение оптической тени

Если потоки ионов в оптической и корпускулярной тени Венеры находились на пределе чувствительности аппаратуры, то потоки электронов в этих областях всегда надежно измерялись при всех тормозящих потенциалах (0÷300 в) и характерными параметрами для электронной компоненты плазмы в диапазоне энергий 10÷80 эв являлись: $n_e \sim 1 \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim (2\div 5) \cdot 10^3 \text{ К}$. Предварительные оценки показывают, что воздействие этих электронных потоков на нейтральную атмосферу может обеспечить существование наблюдаемой ночной ионосферы Венеры; этот вопрос будет рассмотрен авторами в отдельной статье.

Следует отметить, что в предыдущих плазменных экспериментах в окрестности Венеры уже наблюдались явления, которые мы можем интерпретировать сейчас как вход в корпускулярную полутень. При приближении «Венеры-4» к поверхности планеты поток ионов, регистрируемый интегральной ловушкой на высоте ~3000 км, упал до значений меньших, чем в солнечном ветре [2]. При приближении «Маринера-5» к оптической тени потоки ионов, регистрируемые на этом аппарате, также уменьшались [4] и по пересмотренным данным в окрестности точки наибольшего приближения аппарата к оптической тени на расстоянии ~2500 км от нее упали до значений ниже пределов чувствительности прибора [8]. Положение «Венеры-4» (ромбик) и «Маринера-5» (треугольник) в соответствующие моменты времени показано на рис. 7. Штрихпунктирными прямыми на рис. 7 показан «конус» Маха, с углом раствора $\theta = \arcsin 1/M$, $M=8$. Из рисунка видно, что как участки орбит «Венеры-9», на которых наблюдались ионные спектры, характерные для полутени, так и область с наибольшими потоками ионов по данным «Маринера-5» лежат внутри конуса Маха при $M \leq 8$ и наблюдавшиеся на «Маринере-5» явления по их характеру и местоположению можно интерпретировать как вход этого аппарата

в корпускулярную полутень (а отмеченное в [8] исчезновение ионных потоков, возможно, связано с нахождением «Маринера-5» в этот момент времени в корпускулярной тени планеты). «Венера-4» находилась вне приведенного на рис. 7 «конуса» Маха, когда регистрируемые на ней потоки ионов упали до значений, меньших, чем в солнечном ветре. Однако при дальнейшем приближении ее к планете регистрируемые потоки ионов продолжали уменьшаться (упали до предела чувствительности прибора на высоте ~ 2500 км), что также соответствует поведению ионной компоненты плазмы при входе «Венеры-9» в корпускулярную полутень.

Интерпретируя корпускулярную полутень как размытую границу препятствия, остававшегося солнечный ветер у Венеры, и считая, следовательно, что высота препятствия соответствует середине полутени, мы можем сделать некоторые выводы о высоте препятствия над освещенной частью планеты. Как видно из рис. 7, характерное расстояние от оптической тени Венеры до середины участков орбит, на которых наблюдались ионные спектры, отнесенные нами к корпускулярной полутени, составляет ~ 800 км. Естественно предположить, что высота препятствия над поверхностью планеты (а после терминатора высота препятствия над геометрической тенью) является монотонно возрастающей функцией угла φ . Поэтому над освещенной частью Венеры высота препятствия, остававшегося солнечный ветер, меньше ~ 800 км. Это является экспериментальным свидетельством в пользу того, что наблюдаемый на профилях электронной концентрации в ионосфере крутой спад электронной концентрации на высотах ~ 500 км [11] является следствием взаимодействия ионосферы Венеры с солнечным ветром.

Б. Переходная область и околопланетная ударная волна. Как отмечалось выше и как видно из рис. 4, по мере движения спутников в переходной области от корпускулярной полутени к фронту ударной волны A концентрация плазмы n возрастает и далее скачкообразно уменьшается при пересечении фронта ударной волны. Иногда это возрастание концентрации весьма значительно (в 20–50 раз); наблюдалось также более чем четырехкратное уменьшение концентрации плазмы при пересечении ударной волны. Столь большие скачки концентрации плазмы на фронте ударной волны и увеличение n между зоной корпускулярной тени и фронтом, возможно, связаны с наличием дополнительных степеней свободы плазмы в переходной области (колебательных) и с соответствующим уменьшением показателя адиабаты по сравнению с часто используемой величиной $5/3$. Не исключено, что увеличенные градиенты концентрации плазмы в направлении от фронта ударной волны к границе корпускулярной тени по сравнению с земным случаем связаны с различной природой препятствия: магнитопаузы у Земли и диффузной атмосферной границы у Венеры. Однако оба эти вывода нуждаются в дальнейших теоретических и экспериментальных подтверждениях. Следует иметь в виду, что оценки параметров плазмы в условиях сильно флуктуирующих потоков частиц недостаточно надежны (см. выше). Сравнение скачков плазменных параметров на фронте ударной волны со скачками, рассчитанными по соотношениям Рэнкина – Гюгонно, подразумевает отсутствие сильных флуктуаций параметров плазмы за фронтом на расстояниях от него, много меньших радиуса кривизны фронта ударной волны. Такое состояние плазмы может отсутствовать за околовенерианской ударной волной. Действительно, линейный размер области сильных флуктуаций за фронтом бесстолкновительной ударной волны у Венеры и Земли определяется параметрами плазмы солнечного ветра и должен быть примерно одинаков. Однако характерный размер препятствия для солнечного ветра у Венеры в ~ 10 раз меньше, чем у Земли ($\sim 6 \cdot 10^3$ и $\sim 6 \cdot 10^4$ км соответственно). По измерениям, выполненным на спутнике «Веда-4», за фронтом околоземной ударной волны сильные флуктуации наблюдались в области протяженностью $\sim 1500 \div 3000$ км (иногда ее протяженность составляла $\sim 3 \cdot 10^4$ км)

[12] и с соотношениями Рэнкина — Гюгонно сравнивались параметры плазмы по обе стороны от этой области [12]. Для Венеры величина $\sim 1500 \div 3000$ км сравнима с размером переходной области, и в этом случае характеристики течения плазмы в переходной области вне зоны сильных флуктуаций потоков будут определяться не локальными соотношениями Рэнкина — Гюгонно, а полной картиной обтекания планеты.

Несмотря на возможное отсутствие в переходной зоне у Венеры состояния плазмы с малыми флуктуациями, наблюдается согласно положений препятствия и фронта ударной волны с газодинамическими расчетами [10] (см. рис. 7), выполненными в предположении, что граница препятствия является тангенциальным разрывом и что на фронте ударной волны локально выполняются соотношения Рэнкина — Гюгонно (очень малая протяженность области сильных флуктуаций за фронтом ударной волны). Хотя для обтекания Венеры оба эти предположения становятся менее обоснованными (по сравнению с обтеканием солнечным ветром Земли), тем не менее проведенные измерения и, в частности, согласно взаимных положений фронта околопланетной ударной волны и препятствия с газодинамическими расчетами, позволяют говорить о (по крайней мере качественной) применимости газодинамических представлений в случае взаимодействия солнечного ветра с Венерой.

Можно отметить, что приведенные на рис. 7 точки пересечения спутником фронта ударной волны при различных оборотах вокруг планеты сгруппированы вблизи указанного штриховой линией положения фронта; лишь в 5 из 16 пролетов отклонения от фронта (отсчитываемые по нормали к фронту) были ~ 2000 км. Это, по-видимому, свидетельствует в пользу немагнитной природы препятствия, создающего околовенерианскую ударную волну. Действительно, если указанным препятствием является атмосфера или ионосфера Венеры, то из-за малых по сравнению с радиусом планеты шкал высот атмосферы и ионосферы размеры препятствия должны быть достаточно стабильны даже при большом диапазоне изменений динамического давления солнечного ветра, а согласно [10] при $M \gg 5$ и при данном размере препятствия положение фронта мало зависит от M . Около Земли [13, 14] и Марса [15, 16] положения околопланетных ударных волн значительно более изменчивы.

Обсудим теперь особенности фронта околовенерианской ударной волны, отмеченные при отдельных пролетах. Все приведенные здесь пересечения фронта зарегистрированы «Венерой-9» и «Венерой-10» над утренней стороной Венеры¹ в довольно узком интервале планетоцентрических расстояний r и углов φ (см. рис. 7). Ранее пересечения околопланетного фронта над утренней стороной Венеры примерно в этом же интервале r и φ были отмечены на «Маринере-5» и «Маринере-10» [4, 5, 7]. Неопределенность положения фронта по данным этих аппаратов составляла, как уже отмечалось выше, ~ 3000 км и интерпретировалась в терминах «параллельной» ударной волны [8]. Действительно, над утренней стороной Венеры ожидаемые направления спирального межпланетного магнитного поля и нормали к фронту ударной волны скорее коллинеарны, чем ортогональны. Однако в рассматриваемых 16 пролетах весьма широкий фронт ударной волны с характерным размером 3000 км наблюдался только один раз 7.XI 1975 г. и не может считаться типичным.

Большое различие интервалов времени, за которые спутники пересекали фронт ударной волны (от $1 \div 2$ сек до 5 мин или от $10 \div 15$ до ~ 3000 км при покоящемся фронте), может быть связано с различными классами структур ударных волн в зависимости от числа Маха, отношения плотности тепловой энергии к плотности энергии магнитного поля, угла между направлением силовых линий межпланетного магнитного поля и фронтом ударной

¹ Здесь утренней стороной считаем (по аналогии с Землей) сторону, смотрящую по направлению орбитального движения Венеры, несмотря на обратное ее собственное вращение.

волны θ , отношения температур ионов и электронов и т. д. Характер структуры и ширина фронта ударной волны изменяются в зависимости от этих параметров и ширина фронта может составлять, например, $\sim c/\omega_e \approx 2$ км, $\omega_e = \sqrt{4\pi n_e^2/m}$ — ленгмювская частота; $\sim c/\Omega_i \approx 70$ км, $\Omega_i = \sqrt{4\pi n_i^2/M}$ — ионная ленгмювская частота; $\sim c\theta/\Omega_e \approx 2 \div 70$ км при $\sqrt{m/M} < \theta < 1$; $\sim \rho_e \approx 60$ км — тепловой ларморовский радиус ионов и др. [17]. Приведенные оценки ширины фронта сделаны при $n \approx 10$ см⁻³, $T \approx 2 \cdot 10^5$ °К, $H \approx 10\gamma$. Видно, что полученные в эксперименте на станциях «Венера» оценки ширины бесстолкновительной ударной волны не противоречат современным теоретическим представлениям. Дальнейшее детальное изучение отдельных пересечений ударной волны около Венеры потребует использования одновременных данных об электронной и ионной компонентах плазмы и трех компонентах магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При помощи широкоугольных плазменных приборов проведены многократные измерения электронной и ионной компонент плазмы в оптической и корпускулярной тени Венеры, в корпускулярной полутени, в переходной области, при пересечении фронта околопланетной ударной волны и в солнечном ветре.

2. В оптической и корпускулярной тени планеты обнаружены потоки электронов, соответствующие концентрации $n_e \sim 1$ см⁻³ и температуре $T_e \sim (2 \div 5) \cdot 10^6$ К; потоки ионов в этих областях флуктуируют и беспорядочно распределены по всем энергетическим интервалам до 4,4 кэВ. Обнаруженные потоки электронов могут ионизировать нейтральную атмосферу Венеры и объяснить существование ее ночной ионосферы.

3. На несколько сот километров выше оптической тени обнаружена корпускулярная полутень; концентрация и переносная скорость плазмы в ней меньше, чем в переходной области.

4. Потоки заряженных частиц в переходной области сильно флуктуируют; оценки концентрации плазмы показывают значительное ее возрастание при пролете спутника от корпускулярной полутени к фронту ударной волны.

5. Измерения, проведенные при многократных пересечениях фронта околопланетной ударной волны, показали, что структура фронта весьма значительно меняется во времени (от резкого фронта толщиной порядка 10 км до диффузного, растянутого на протяжении ~ 3000 км).

6. Наблюдаемые при различных пролетах точки пересечения спутниками фронта ударной волны имеют довольно малый разброс и соответствующие им положения фронта сгруппированы у наиболее близких к планете; это, по-видимому, свидетельствует в пользу немагнитной природы препятствия у Венеры.

Дата поступления
19 мая 1976 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Г. И. Волков и др. Космич. исслед., 12, № 3, 430, 1974.
2. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Л. С. Мусатов, Т. К. Бреус. Космич. исслед., 6, № 3, 411, 1968.
3. Ш. Ш. Долгунов, Е. Г. Ермошенко, Л. Н. Жуков. Космич. исслед., 6, № 4, 561, 1968.
4. H. S. Bridge, A. J. Lazarus, C. W. Snyder et al. Science, 158, 1969, 1967.
5. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Г. И. Волков, Л. С. Мусатов, Т. К. Бреус. Космич. исслед., 8, 431, 1970.
6. H. S. Bridge, A. J. Lazarus, J. D. Scudder et al. Science, 183, 1293, 1974.
7. N. F. Ness, K. W. Behannon, R. P. Lepping, Y. C. Whang, K. H. Schatten. Science, 183, 4131, 1974.
8. H. S. Bridge, R. E. Hartle, A. J. Lazarus et al. Interaction of the Solar Wind with Venus. Preprint of Paper Presented at USA — USSR Bilateral Seminar. Moscow, November 1975.

9. *К. Н. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус и др.* Письма в Астрон. ж., 2, № 2, 82, 1976.
10. *J. R. Spreiter, A. L. Summers, A. W. Rizzi*, Planet. Space Sci., 18, 1281, 1970.
11. *G. Fjeldbo, V. R. Eshleman*. Radio Sci., 4, 879, 1969.
12. *M. D. Montgomery, J. R. Asbridge, S. J. Bame*. J. Geophys. Res., 75, 1217, 1970.
13. *D. H. Fairfield*, J. Geophys. Res., 76, 8700, 1971.
14. *В. В. Безруких, Т. К. Бреус, М. Н. Веризин, Ш. А. Мейсурадзе, А. П. Ремизов, Э. К. Соломатина.* «Зависимость положений земной магнитопаузы и ударной волны от параметров солнечного ветра и плазменная структура магнитопаузы по данным ловушек заряженных частиц на спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2». Препринт ИКИ АН СССР Д-192, М., 1975.
15. *К. В. Грингауз, В. В. Безруких, М. Н. Веризин и др.* Препринт ИКИ АН СССР Д-194, М., 1975.
16. *К. Н. Грингауз.* «Обзор данных по взаимодействию солнечного ветра с Марсом, полученных при помощи ловушек заряженных частиц на спутниках «Марс-2, 3 и -5». Препринт ИКИ АН СССР, Д-220, М., 1975.
17. *Р. З. Сагдеев.* Сб. «Вопросы теории плазмы», М., Атомиздат, 1964, стр. 20.