

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Веригин Михаил Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ
С ВЕНЕРОЙ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВ "ВЕНЕРА-9" И "ВЕНЕРА-10"
(ПО ДАННЫМ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ)

01.04.01 - экспериментальная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
1978

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Плазменные и магнитные измерения, проведенные еще на первом космическом аппарате, осуществившем спуск в атмосфере Венеры - автоматической межпланетной станции "Венера-4", 1967г., показали, что вблизи планеты существует возмущение типа ударной волны, и что собственное магнитное поле Венеры очень мало по сравнению с земным. Малость магнитного поля Венеры позволяет солнечному ветру непосредственно воздействовать на нейтральную и ионизированную компоненты атмосферы планеты, что приводит к потере атмосферных частиц и определяет важность изучения взаимодействия потоков солнечной плазмы с Венерой в эволюционном плане.

Однако экспериментальные данные, полученные в этом и в последующих трех пролетах советских и американских космических аппаратов через область взаимодействия солнечного ветра с Венерой ("Маринера-5" в 1967г., "Венеры-6" в 1969г. и "Маринера-10" в 1974г.), на которых были установлены приборы для изучения плазмы и магнитного поля, оставили процессы, происходящие при взаимодействии солнечного ветра с этой планетой, в значительной мере неясными не только в количественном отношении, но и качественно. Это было связано с тем, что во всех экспериментах, проведенных в окрестности Венеры до 1975г., область взаимодействия солнечного ветра с Венерой пересекалась однократно, и поэтому экспериментальные результаты были немногочисленны; с тем, что траектории космических аппаратов не позволили получить информацию о явлениях в оптической тени Венеры и с тем, что одновременные измерения ионной и электронной ком-

понент плазмы на космических аппаратах не были проведены.

Неопределенность и ограниченность экспериментальных данных привела в тупик и теоретическое рассмотрение взаимодействия солнечного ветра с Венерой, несмотря на многочисленные попытки представить, как Венера взаимодействует с солнечным ветром.

Актуальной стала следующая задача: провести в окрестности Венеры достаточно простой плазменный эксперимент, чтобы получить надежные качественные ответы, по крайней мере, на часть вопросов о том, что происходит при взаимодействии солнечного ветра с Венерой.

Для выполнения этой задачи на спутниках Венеры "Венера-9" и "Венера - 10" были установлены широкоугольные плазменные анализаторы.

Целью диссертации является подведение итогов пройденного к настоящему времени этапа обработки обширного массива данных, полученных в эксперименте по исследованию взаимодействия потоков солнечной плазмы с Венерой при помощи широкоугольных плазменных анализаторов на спутниках "Венера - 9" и "Венера-10".

Научная новизна работы определяется новизной полученных в эксперименте данных и сделанных на их основе выводов. Рассматриваемые эксперименты явились первыми, в которых были проведены одновременные измерения ионной и электронной компонент плазмы в окрестности Венеры, а также первыми экспериментами в которых плазменные измерения выполнялись в оптической тени Венеры. Результаты плазменных измерений были получены более чем с 30 оборотов спутников "Венера - 9" и "Венера - 10" вокруг планеты. Общий объем сведений о взаимодействии солнечной плазмы с Венерой в результате экспериментов на указан-

ных спутниках увеличился более, чем на порядок и включил в себя качественно новую информацию о физических явлениях вблизи Венеры.

Основные научные результаты, которые выносятся на защиту, можно сформулировать следующим образом:

1. Препятствие, создающее ударную волну у Венеры, не образовано собственным магнитным полем планеты и его высота в окрестности терминатора $\approx 10^3$ км.

2. Для описания обтекания солнечным ветром Венеры применены гидродинамические модели, качественно согласующиеся с распределением потоков и концентрации плазмы в переходной области и взаимным положением препятствия и фронта ударной волны.

3. На основании измерений потоков электронов сделан вывод о существовании у Венеры плазменно-магнитного хвоста.

4. Внутри области взаимодействия солнечного ветра с Венерой установлено существование области корпускулярной полутени, в которой переносная скорость меньше, чем допускает гидродинамическими расчетами; на расстояниях $(3 + 4)R_p$ от планеты корпускулярная полутень заполняет весь плазменно-магнитный хвост. На более близких расстояниях от Венеры в плазменно-магнитном хвосте обнаружена область, в которой регулярная регистрация ионных потоков при помощи использованной в эксперименте аппаратуры отсутствует - область корпускулярной тени.

5. В окрестности изменения знака компоненты магнитного поля вдоль оси Солнце-Венера в плазменно-магнитном хвосте Венеры обнаружены потоки энергичных ионов, свидетельствующие о наличии в этой области процессов ускорения и о существовании плазменного слоя в хвосте.

6. Предложена и разработана гипотеза о происхождении верхнего максимума ионизации в ночной ионосфере Венеры, объясняющая его воздействием на ночную верхнюю атмосферу потоков малоэнергичных электронов, обнаруженных в оптической тени Венеры.

Обоснование научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, производится посредством анализа применявшейся в эксперименте методики измерения энергетических спектров ионов и электронов, а также сравнением полученных экспериментальных данных как с данными более ранних плазменных измерений в окрестности Венеры, так и с данными плазменных измерений в окрестности других планет.

Практическая ценность. Качественно новая информация, полученная в ходе рассматриваемого в диссертации эксперимента, позволила ответить на ряд вопросов физики взаимодействия солнечного ветра с Венерой, не выясненных до полета "Венеры - 9" и "Венеры - 10", привела к лучшему пониманию такого взаимодействия и к возникновению новых, более конкретных вопросов. Выявленное сходство физических процессов, происходящих за Венерой, с процессами, происходящими в магнитосфере Марса /как это следует из данных советских спутников "Марс" / и в хвостах магнитосфер планет со значительным собственным магнитным полем, может уточнить наши представления об их физической сущности. Особую ценность результаты плазменного эксперимента с широкоугольными анализаторами на спутниках "Венера - 9" и "Венера - 10" представляют для планирования новых экспериментов в окрестности Венеры - для выбора цели более детальных исследований и диапазона измерений необходимых для ее осуществления приборов.

Результаты работы могут практически использоваться в научных учреждениях, ведущих экспериментальные или теоретические исследования околовенераианского пространства, а именно в ИРЭ АН СССР, ИЗМИР АН СССР, ИПМ АН СССР, ИКФИА СО АН СССР, МФТИ МинВУЗ РСФСР, Красноярском филиале ВЦ СО АН СССР.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах в ИКИ АН СССР, на международном симпозиуме по солнечно-земной физике в Болдере /Колорадо, США, 1976 г/ на Международном симпозиуме по взаимодействию солнечного ветра с Венерой /Сиэтл, США, 1977 г/, опубликованы в журналах "Письма в Астрон. журнал", "ДАН СССР", "Космические исследования", "Journal of Geophys. Research".

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 143 страницы машинописного текста, 69 рисунков, 7 таблиц, 170 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается выбор темы диссертации, ее актуальность и существенное значение для развития физики солнечной системы, излагается план работы и формулируются основные научные результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе рассматривается состояние проблемы взаимодействия солнечного ветра с Венерой до полета спутников "Венера - 9" и "Венера - 10", на которых был выполнен эксперимент с широкоугольными плазменными анализаторами. Обсуждаются все проведенные ранее измерения плазмы и магнитного поля в области взаимодействия солнечного ветра с Венерой. Кроме этого, рассмотрены имеющиеся сведения о взаимодействующих с солнечным ветром ионосфере и верхней атмосфере Венеры и результаты ла -

бораторного моделирования такого взаимодействия. Выполненный в этой же главе обзор теоретических представлений и моделей взаимодействия солнечного ветра с Венерой свидетельствует о невозможности однозначной интерпретации имевшихся экспериментальных данных и, следовательно, о необходимости дальнейших плазменных экспериментов в этой области. В конце первой главы перечислены некоторые поставленные в литературе вопросы физики взаимодействия солнечного ветра с Венерой, оставшиеся неясными до экспериментов на "Венере - 9" и "Венере - 10".

Вторая глава содержит материалы, относящиеся к постановке эксперимента с широкоугольными плазменными анализаторами на спутниках "Венера - 9" и "Венера - 10". В ней приводятся энергетические и угловые характеристики использовавшихся дифференциального ионного модуляционного и интегрального электронного анализаторов, диапазоны измерения потоков заряженных частиц приборами, их ориентация при измерениях и времена, необходимые для получения энергетического спектра в различных режимах работы.

Оценка концентрации, переносной скорости и температуры ионов, концентрации и температуры электронов окружающей спутник плазмы по энергетическим спектрам производилась путем сравнения измеренных спектров с расчетными.

Во второй главе рассмотрено также влияние на точность определения параметров плазмы следующих факторов: дискретности телеметрии и особенности калибровочных характеристик усилителей: флуктуирующий регистрируемых токов; отличия функции распределения заряженных частиц от максвелловской; отклонения направления переносной скорости от используемого при оценке параметров; изменения параметров плазмы за время измерения

спектров; присутствия фотоэлектронов, выбитых с поверхности спутника и связанного с этим потенциалом его поверхности. Отмечается, что использованная в эксперименте методика измерения энергетических спектров заряженных частиц, являясь мало чувствительной к ориентации спутников, позволяла получить надежное описание имеющихся в окрестности Венеры плазменных образований с неизвестными ранее свойствами.

В третьей главе излагаются результаты измерений электронной и ионной компоненты плазмы в области взаимодействия солнечного ветра с Венерой. Показано, что наблюдаемые при различных пролетах точки пересечения спутниками фронта ударной волны имеют довольно малый разброс и сгруппированы у наиболее близких к планете. Это свидетельствует о стабильных размерах препятствия, создающего околосолнечную ударную волну.

Результаты измерений электронной компоненты плазмы позволили сделать вывод о существовании у Венеры плазменно-магнитного хвоста.

За Венерой выявлена область корпускулярной тени, характерным признаком которой является отсутствие регулярной регистрации ионных потоков. Между корпускулярной тенью и переходной областью за фронтом ударной волны обнаружена корпускулярная полутень, внутри которой ионная компонента плазмы характеризуется переносными скоростями, меньшими, чем допускаемые бездиссипативными магнитогидродинамическими моделями. Корпускулярная тень находится на расстояниях, не превышающих $(3 + 4) R_{\phi}$ от планеты; на больших расстояниях корпускулярная полутень заполняет весь плазменно-магнитный хвост.

По данным измерений в электронной и ионной компоненте плазмы высота препятствия в окрестности терминатора, отклоняю-

щего солнечный ветер у Венеры, определена как $\approx 10^3$ км.

Показано, что относительно направления прихода солнечного ветра плазменно-магнитный хвост Венеры приблизительно симметричен; на расстояниях $(3 + 4)R_0$ от планеты его радиус составляет $\approx R_0$. При входе в плазменно-магнитный хвост давление плазмы падает, а давление магнитного поля возрастает; их сумма в пределах точности определения давлений сохраняется.

Внутри плазменно-магнитного хвоста, в окрестности изменения знака проекции вектора магнитного поля на ось Солнце-Венера, обнаружено существование плазменного слоя. Потoki ионов в плазменном слое регистрируются вплоть до максимальных энергий измеряемых прибором $\approx 4,4$ кэВ.

В прилегающей к планете части плазменно-магнитного хвоста выявлены потоки электронов. Величина потоков изменяется от пролета к пролету.

Четвертая глава диссертации посвящена обсуждению результатов околосолнечного плазменного эксперимента, которые сопоставляются с теоретическими работами и с результатами плазменных измерений в окрестности других планет /в окрестности Земли и Марса ранее также были проведены плазменные эксперименты по аналогичной методике/.

Показано, что структура фронта околосолнечной волны типична для бесстолкновительных ударных волн. На большом экспериментальном материале подтверждена отмечавшаяся ранее Гриншадтом зависимость толщины фронта околосолнечной ударной волны от угла между вектором межпланетного магнитного поля и нормалью к фронту, аналогичная существующей для фронта околосолнечной ударной волны.

На основании сравнения разброса положений фронта удар-

ной волны у Марса, Земли и Юпитера с разбросом положений фронта у Венеры и отсутствия связи между его положением и динамическим давлением солнечного ветра сделан вывод, что препятствие, создающее ударную волну у Венеры, имеет другую природу, чем у этих планет, то есть не образовано собственным магнитным полем Венеры.

Экспериментально обоснована качественная применимость гидродинамических представлений для обтекания солнечным ветром Венеры. С гидродинамическими расчетами согласуются: взаимное положение фронта ударной волны и препятствия; распределение потоков и концентрации плазмы в переходной области.

Сравнением плазменных образований внутри плазменно-магнитного хвоста Венеры с аналогичными плазменными образованиями в хвостах магнитосфер Земли и Марса выявлено их сходство. Показано, что заполнение плазмой плазменно-магнитного хвоста Венеры происходит в основном непосредственно за планетой.

Сделан вывод, что потоки электронов, обнаруженные в плазменно-магнитном хвосте Венеры, достаточны для создания ночной ионосферы с величиной электронной концентрации в максимуме ионосферы $\approx 10^4 \text{ см}^{-3}$; при сравнении результатов плазменного и радиозатмного экспериментов на спутниках Венеры обнаружена корреляция интенсивности потоков высыдающихся электронов с данными радиозатменных измерений. На основании этой корреляции сделан вывод о важном вкладе потоков электронов плазменно-магнитного хвоста Венеры с энергией в несколько десятков электронов-вольт в формирование верхнего максимума ночной ионосферы. В настоящее время появились работы Нэги и Чена /J. Geophys. Res. 83, 1133, 1978; Geophys. Research Letters, 5, 613, 1978 /, также разрабатывавшие гипотезу о происхожде-

нии верхнего максимума ионизации в ночной ионосфере Венеры при воздействии на верхнюю атмосферу электронных потоков.

В заключении кратко подытоживаются описанные в Гл. III, IV ранее неизвестные особенности взаимодействия солнечного ветра с Венерой и приводятся соображения о задачах дальнейших плазменных экспериментов в окрестности этой планеты и приборах, необходимых для их решения.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. К.И. Грингауз, В.В. Безруких, Т.К. Бреус, М.И. Веригин, Г.И. Волков, Т. Гомбоши, А.П. Ремизов, Предварительные результаты измерений плазмы при помощи широкоугольных приборов на спутниках "Венера-9" и "Венера - 10", Косм. исслед., 14, 839, 1976.
2. K.I.Gringaus, V.V.Bezrukikh, T.K.Breus, T.Gombosi, A.P.Remizov, M.I.Verigin, G.I.Volkov, Plasma observations near Venus onboard the Venera-9 and -10 satellites by means of wide-angle plasma detectors, in Physics of solar planetary environments, ed. by D.J.Williams, AGU, Boulder, Colorado, 1976, p.918.
3. M.I.Verigin, K.I.Gringaus, T.Gombosi, T.K.Breus, V.V.Bezrukikh, A.P.Remizov, G.I.Volkov, Plasma near Venus from the Venera-9 and -10 wide-angle analyser data, preprint D-251, Space Research Institute, Academy of Sciences, USSR, Moscow, 1977; J.Geophys.Res., 83, 3721, 1978.
4. К.И. Грингауз, В.В. Безруких, Т.К. Бреус, М.И. Веригин, Г.И. Волков, А.П. Ремизов, Г.Ф. Слученков, Предварительные результаты измерений плазмы вблизи Венеры при помощи спут-

- ника "Венера - 9", Письма в астрономический журнал, 2, 82, 1976.
5. К.И. Грингауз, М.И. Веригин, Т.К. Бреус, Т. Гомбози, Электронные потоки, измеренные в оптической тени Венеры на спутниках "Венера - 9" и "Венера - 10" - основной источник ионизации в ночной ионосфере Венеры, Доклады АН СССР, 232, 1039, 1977.
 6. K.I.Grिंगауз, M.I.Verigin, T.K.Breus, T.Gombosi, The interaction of solar wind electrons in the optical umbra of Venus with the planetary atmosphere - the origin of the nighttime ionosphere, preprint D-250, Space Research Institute, Academy of Sciences, USSR, Moscow, 1977.
 7. К.И. Грингауз, В.В. Безруких, Г.И. Волков, М.И. Веригин, Л.Н. Давытаев, В.Ф. Кошлов, Л.С. Мусатов, Г.Ф. Слученков, Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля-Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971 - 1973 г.г. I. Методы и приборы, Косм. исслед., 12, 430, 1974.
 8. К.И.Грингауз, В.В. Безруких, Т.К. Бреус, М.И. Веригин, Г.И. Волков, А.В. Дьячков, Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля-Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971-1973 гг. II. Характеристики электронов вдоль орбит искусственных спутников Марса "Марс-2" и "Марс-3", Косм. исслед., 12, 585, 1974.
 9. К.И. Грингауз, В.В. Безруких, М.И. Веригин, А.П.Ремизов, Исследования солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля-Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971- 1973 гг. III. Характеристики ионной и электронной компонент плазмы в антисолнеч-

ной части околосолнечного пространства, измеренные на
спутнике "Марс-5", Косм. исслед., I3, I23, 1975.