

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XXIV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1

МОСКВА · 1986

УДК 523.72:523.42

*Т. К. Бреус, М. И. Веригин, К. И. Грингауз***О СВОЙСТВАХ ИОНОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ И ЕЕ ИСТОЧНИКАХ**

Рассматриваются свойства дневной и ночной ионосферы Венеры и некоторые возможные источники ее ионизации. Обсуждаются расхождения результатов измерений в различных экспериментах на автоматических станциях и результатов наблюдений верхней ионосферы радиозатменными методами. Показано, что пока не удастся дать удовлетворительное количественное описание ионосферы Венеры в целом.

После экспериментов, проведенных на советских спутниках Венеры «Венера-9, -10» и на американском спутнике «Пионер-Венера», появилось много публикаций, в которых описывались экспериментальные данные, обсуждались источники ионизации и рассчитывались модели ионосферы Венеры. Однако измерения, проводившиеся различными методами даже на одном и том же космическом аппарате, довольно часто не давали согласующихся результатов. Причиной таких различий могли быть и погрешности методов определения ионосферных параметров по результатам измерений на спутниках в реальной атмосфере Венеры, и различное пространственное разрешение приборов, и различие критериев, по которым отождествлялись структурные особенности того или иного исследуемого явления. Достаточно полный анализ причин расхождения данных различных экспериментов в настоящее время также отсутствует. Таким образом, ионосфера Венеры скорее поддается качественному, но не точному количественному описанию, несмотря на многочисленные предпринимаемые попытки. Другой причиной, затрудняющей количественное описание ионосферы Венеры, особенно ночной ее части, является присущая ей нестационарность. В настоящей статье проводится обзор опубликованных экспериментальных данных об ионосфере Венеры и делается попытка анализа этих данных и физических представлений, на которых основаны различные количественные модели ионосферы Венеры.

Для того, чтобы получить общее представление об ионосфере Венеры на рис. 1 и 2 представлены профили электронной концентрации n_e над дневной (рис. 1) и ночной (рис. 2) сторонами планеты, полученные при радиозатмениях спутников «Венера-9, -10» [1–5]. Обращает на себя внимание регулярный характер дневных $n_e(h)$ -профилей и их изменчивость в ночной ионосфере. Кроме главного максимума электронной концентрации, на многих профилях присутствует и нижний максимум ионизации. Верхняя граница ионосферы (ионопауза) на радиозатменных профилях проявляется в виде резкого спада электронной концентрации (рис. 1).

Условно ионосферу Венеры можно разделить на три области: область главного и нижнего максимумов ионизации; область ионопаузы; промежуточная между ними область, в которой характер распределения электронной концентрации сильно изменяется с изменением зенитного угла Солнца.

1. Главный и нижний максимумы ионизации. Статистически достоверная информация о главном и нижнем максимумах ионизации в ионосфере Венеры получена только в радиозатменных экспериментах. Высота пери-

центра орбиты американского спутника «Пионер-Венера» была всегда ≥ 150 км и только в 8 случаях в ночной ионосфере этот спутник опускался ниже ~ 145 км, что не позволяло проводить систематические исследования области главного максимума ионизации прямыми методами.

а) Концентрация электронов в максимумах ионизации. На рис. 3 представлены имеющиеся сведения о величине концентрации электронов в главном n_{em} и нижнем n_{el} максимумах ионизации по данным радиозатмений спутников Венеры. Информация о n_{em} и n_{el} в дневной ионо-

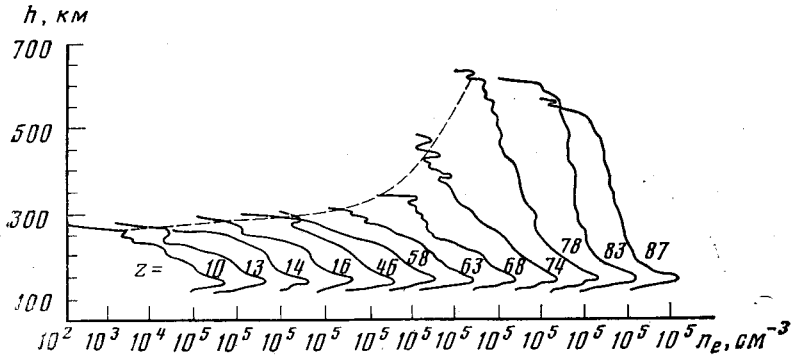


Рис. 1

Рис. 1. Высотные профили электронной концентрации в дневной ионосфере Венеры, полученные по данным наблюдения радиозатмений искусственных спутников «Венера-9, -10» при различных значениях зенитных углов Солнца z . Штриховая линия — ионопауза

Рис. 2. Высотные профили электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры по данным наблюдения радиозатмений «Венеры-9» 28.XI 1975 г., $z=150^\circ$ (а), «Венеры-10» 4.XI 1975 г., $z=146^\circ$ (б) и 2.XI 1975 г., $z=144^\circ$ (в) [2].

Штриховая кривая — расчетный профиль электронной концентрации, образованной ударной ионизацией электронными потоками, измеренными на тех же аппаратах [54]

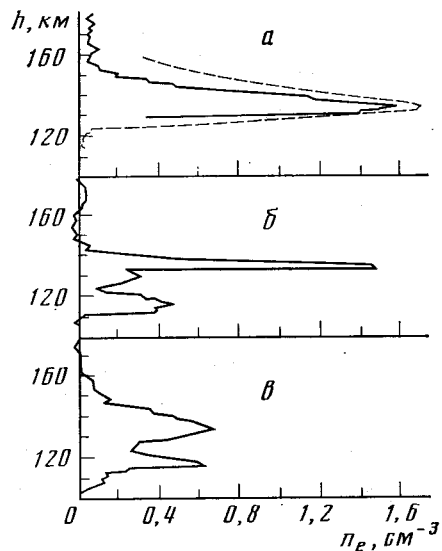


Рис. 2

сфере взята из работ [3–6], а данные, относящиеся к ночной ионосфере — из работ [2, 7].

Как можно видеть на рис. 3, в дневной ионосфере n_{em} монотонно уменьшается с возрастанием зенитного угла z . Относительная величина этого уменьшения n_{em} хорошо описывается теорией простого слоя Чепмена [8], что свидетельствует о том, что главный максимум ионизации, созданный ультрафиолетовым излучением Солнца, формируется в условиях фотохимического равновесия. Меньшие значения $n_{e0}=5 \cdot 10^5$ см $^{-3}$ по данным радиозатменных экспериментов на спутниках «Венера-9, -10» по сравнению с $n_{e0}=7,4 \cdot 10^5$ см $^{-3}$, по данным спутника «Пионер-Венера», можно объяснить тем, что радиозатменный эксперимент на этом спутнике проводился в условиях более высокой солнечной активности ($F_{10,7} =$

$= (175 \div 215) \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$), чем на спутниках «Венера-9, -10» $(70 \div 80) \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$.

Нижний максимум ионизации дневной ионосферы n_{el} также хорошо описывается теорией Чепмена и формируется в условиях фотохимического равновесия, но под действием не ультрафиолетового, а мягкого рентгеновского излучения Солнца.

В ночной ионосфере Венеры n_{em} и n_{el} на $1,5 \div 2$ порядка величины меньше, чем в дневной ионосфере. Концентрация электронов в обоих максимумах ионизации над ночной стороной планеты подвержена значительным вариациям (рис. 3), причем в нижнем максимуме ионизация n_{el} часто бывает меньше нескольких сотен электронов в кубическом сантиметре порога чувствительности радиозатменных экспериментов.

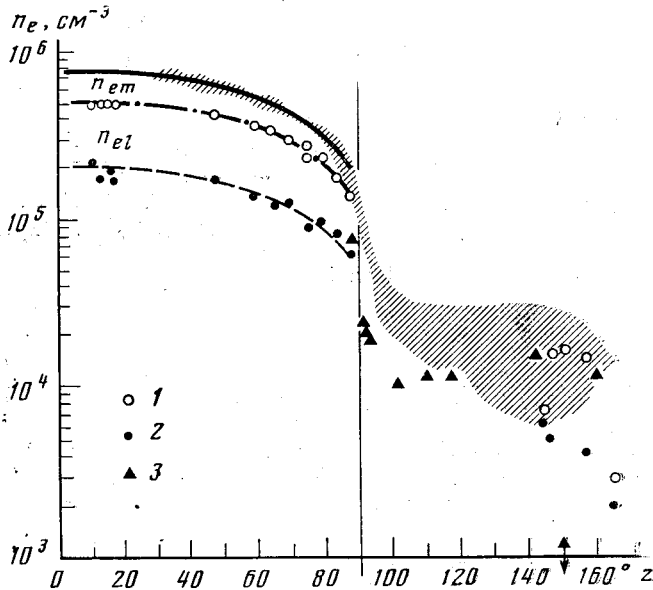


Рис. 3. Зависимость электронной концентрации в главном n_{em} (1 — «Венера-9, -10») и нижнем n_{el} (2 — «Венера-9, -10», 3 — «Пионер-Венера») максимумах ионизации в ионосфере Венеры от зенитного угла Солнца z .

Заштрихованная область иллюстрирует интервал вариаций данных n_{em} , полученных на «Пионер-Венере». Сплошной штрихпунктирной линией и штриховой показаны зависимости концентрации электронов от зенитного угла согласно теории простого слоя Чепмена при электронной концентрации в подсолнечной точке, соответственно равной $7,4 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

б) Высота максимумов ионизации. На рис. 4, построенном на основании тех же источников экспериментальных данных, что и рис. 3, приведена зависимость от z высоты главного h_m и нижнего h_l максимумов ионизации в ионосфере Венеры. С дневной стороны планеты при $z \leq 70^\circ$ высота обоих максимумов остается практически неизменной, тогда как согласно теории Чепмена в случае независимой от z нейтральной атмосферы h_m и h_l должны монотонно возрастать с увеличением z из-за того, что при больших z волновое излучение Солнца должно пройти больший путь в атмосфере, чтобы достичь соответствующей высоты. Неизменность h_m и h_l является следствием уменьшения температуры верхней атмосферы с увеличением z , что приводит к уменьшению концентрации нейтральных частиц, компенсирующему рост длины пути излучения в атмосфере [4, 6].

Оба фактора, влияющие на высоту максимума электронной концентрации, компенсируются не вполне точно, и из приведенных на рис. 4 результатов измерений h_m при помощи спутника «Пионер-Венера» можно видеть уменьшение высоты при $z \geq 70^\circ$, за которым следует рост h_m при $z \geq 82^\circ$.

Таким образом, преобладающее при $z \geq 70^\circ$ влияние уменьшения концентрации нейтралов на высоту h_m сменилось при $z \geq 82^\circ$ ростом h_m , предсказанным теорией Чепмена [8].

В ночной ионосфере при $z \geq 110^\circ$ средняя высота h_m практически постоянна (~ 143 км), однако значительно более изменчива от витка к витку, чем в дневной ионосфере. Средняя высота нижнего максимума ионосферы Венеры ночью $h_l \approx 118$ км [9], и, таким образом, в это время суток расстояние между главным и нижним максимумами ионизации составляет ~ 25 км, что примерно в 2 раза превышает величину $h_m - h_l$ в дневной ионосфере (см. рис. 4).

2. Положение и динамика ионопаузы. Воздействие динамического давления солнечного ветра на ионосферу Венеры является физической причи-

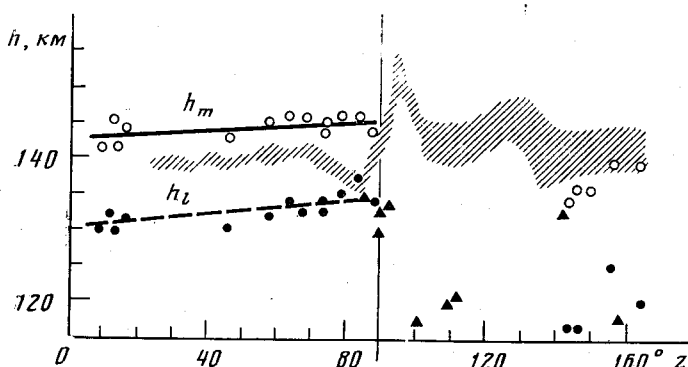


Рис. 4. Зависимость высоты главного h_m и нижнего h_l максимумов ионизации от зенитного угла Солнца. Обозначения те же, что и на рис. 3. Вертикальная прямая — терминатор

пой, ограничивающей ее протяженность с дневной стороны. На радиозатменных $n_e(h)$ профилях верхняя граница ионосферы (ионопауза) проявляется в виде резкого спада электронной концентрации (см. рис. 1).

О существовании ионопаузы стало известно после радиозатменного эксперимента на «Маринере-5» [10]. Систематические ее наблюдения на спутниках «Венера-9, -10» позволили сделать вывод [3] о монотонном возрастании высоты ионопаузы h_i с ростом зенитного угла Солнца при $z \leq 80^\circ$. Однако существенно более многочисленные прямые измерения положения ионопаузы на спутнике «Пионер-Венера» кроме общего роста h_i с увеличением z выявили и ее значительную изменчивость.

Причиной изменений высоты ионопаузы при фиксированном значении z является изменение динамического давления солнечного ветра. Но дневная ионосфера не непосредственно взаимодействует с солнечной плазмой. От солнечного ветра, разогретого на фронте отошедшей околосферической ударной волны, ионосферу отделяет область с повышенными значениями магнитного поля — магнитный барьер, служащий «мембраной», передающей ионосфере давление солнечного ветра. Анализ связи между динамическим давлением солнечного ветра, магнитным давлением в магнитном барьере, высотой ионопаузы и давлением ионосферной плазмы под ионопаузой проводился в ряде работ [11–14]. Оказалось, что давления в магнитном барьере и в солнечном ветре приблизительно равны, а высота ионопаузы уменьшается с ростом обоих давлений, но зависит от их величины нелинейно. Давления ионосферной плазмы и магнитного поля в магнитном барьере также приблизительно равны [12, 13]. Даже при больших динамических давлениях солнечного ветра дневная ионопауза ниже ~ 200 км не наблюдалась.

В работе [15] отмечается существование ионопаузы и с ночной сторо-

ны Венеры, однако положение ее еще более изменчиво, чем над дневной и вечерней сторонами планеты: иногда ночная ионопауза регистрировалась на очень низких высотах ~ 200 км, а иногда лежала выше 3500 км. В радиозатменном эксперименте на «Маринере-5» граница ночной ионосферы наблюдалась на высоте ~ 3700 км [10]. Физические процессы, приводящие к образованию ионопаузы над ночной стороной планеты не ясны и даже не ясно, является ли она квазистационарным, как дневная ионопауза, или динамическим образованием.

3. Ионосфера между главным максимумом ионизации и ионопаузой. Основные сведения об ионосфере между главным максимумом ионизации

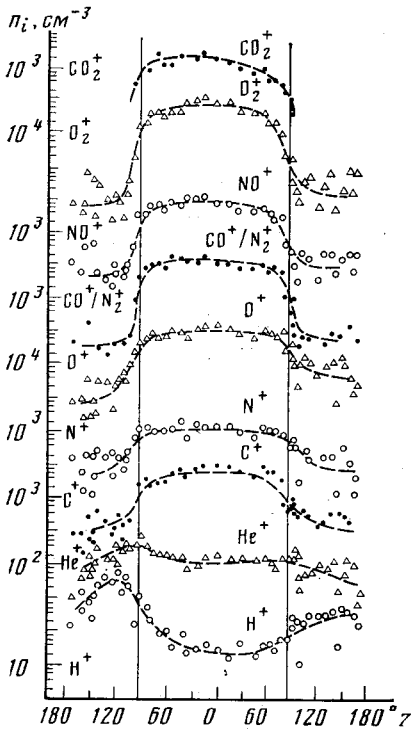


Рис. 5

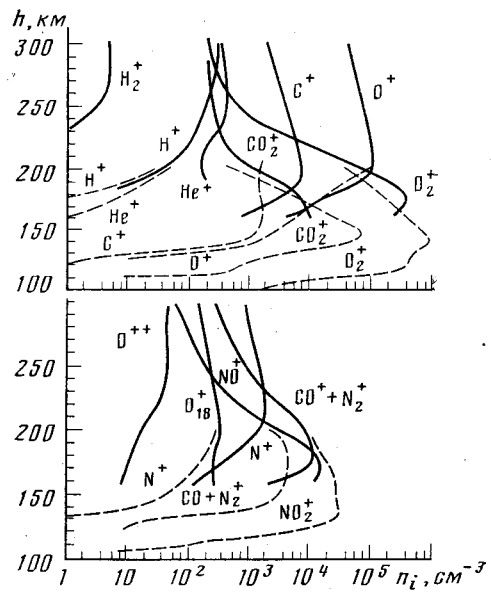


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость ионного состава в ионосфере Венеры от зенитного угла Солнца по данным измерений на «Пионер-Венера» на высоте 200 км [20]

Рис. 6. Ионный состав в дневной ионосфере Венеры по данным измерений на «Пионер-Венере» для витка 185 $z=110^\circ$ [120].

Штриховыми линиями показаны высотные распределения ионных компонентов для $z=0^\circ$ в модели [42]

и ионопаузой получены в результате систематических прямых измерений при помощи спутника «Пионер-Венера». Ранее для этой области были известны только верхний предел концентрации ионов с ночной стороны планеты («Венера-4» [16]) и сведения об электронной концентрации, полученные радиометодами (см. п. 1).

а) Суточные изменения ионного состава. Измерения ионного состава на спутнике «Пионер-Венера» проводились при помощи радиочастотного ионного масс-спектрометра (OIMS) [17–19]. Распределение и температура главных ионосферных составляющих могли также измеряться при помощи широкоугольного анализатора с тормозящим потенциалом (ORPA) [20–22]. На рис. 5 показан суточный ход на высоте 200 км концентрации различных ионов, построенный по результатам измерений при помощи OIMS, полученным на протяжении первых двух вене-

рианских лет работы спутника. Данные взяты из работы [10], но упорядочены в порядке убывания молекулярных весов ионов.

Характерной особенностью суточного изменения концентрации тяжелых молекулярных ионов является ее резкий спад на терминаторе при переходе в ночную ионосферу, составляющий 2÷3 порядка величины (рис. 5). У более легких ионов O^+ , N^+ , C^+ этот спад менее выражен, их концентрация в ночной верхней ионосфере падает на 1÷2 порядка величины. Для легких ионов H^+ и He^+ наблюдается даже несимметричный подъем концентрации в ночное время, особенно ярко выраженный в предутренние часы. Балансируя эту асимметрию в суточном распределении H^+ , ион O^+ и молекулярные ионы в ночной верхней ионосфере большей

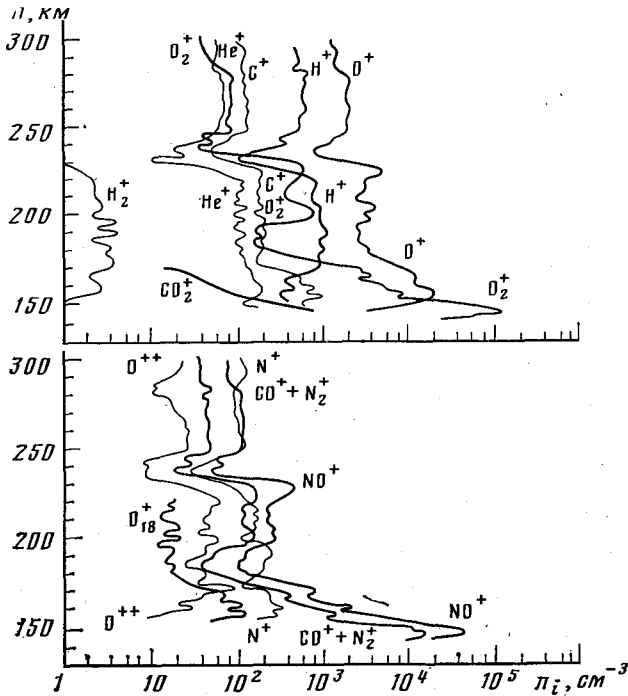


Рис. 7. Высотные распределения ионов в ночной ионосфере Венеры, построенные по данным измерений на спутнике «Пионер-Венера» с помощью масс-спектрометра [20] для витка 65 ($z=162^\circ$)

частью сконцентрированы в послезакатные часы и, таким образом, общая концентрация ионов не имеет значительной утренне-вечерней асимметрии.

Концентрация всех измеренных ионов имеет ярко выраженные флуктуации в ночной ионосфере и около терминатора (рис. 5), возможно связанные с нерегулярным характером солнечного ветра и геометрии межпланетного магнитного поля, и поэтому поведение ночной ионосферы в высокой степени непредсказуемо [19].

б) Высотное распределение концентрации ионов. На рис. 6, 7 приведены «высотные профили» концентрации различных ионов $n_i(h)$ соответственно в дневной и ночной частях ионосферы Венеры [19]. В строгом смысле приведенные зависимости $n_i(h)$ не являются высотными профилями, поскольку они измерены вдоль очень пологой вблизи перигентра траектории спутника «Пионер-Венера» и не свободны от искажений в результате пространственных неоднородностей и временных изменений различного масштаба. Возможно, именно этими причинами и

объясняется наличие на рис. 6 максимума концентрации O_2^+ (иона, преобладающего в главном максимуме ионизации ионосферы) на высоте ~ 175 км, тогда как по радиозатменным данным в дневное время максимум ионизации никогда не наблюдался на таких высотах (см. рис. 4).

Концентрация O_2^+ в главном максимуме ионизации ночной ионосферы по данным масс-спектрометрических измерений на 65 витке равна $\sim 4,5 \cdot 10^5$ см $^{-3}$ (рис. 7). Однако максимальные значения n_{em} , наблюдавшиеся в радиозатменных экспериментах в этой области приблизительно в 5 раз ниже (см. рис. 3). Отмеченное расхождение не является единственным среди массива экспериментальных данных различных приборов на спутнике «Пионер-Венера». Например, в 1,63 раза были увеличены концентрации нейтральной атмосферы в важной для физики ионосферы модели, основывающейся на данных измерений при помощи масс-спектрометра нейтральных частиц (ONMS) [23]. Очевидно, что необходим осторожный подход к количественным выводам, сделанным на основании измерений в окрестности Венеры.

Качественно же результаты масс-спектрометрических наблюдений показывают преобладание в нижней ионосфере иона O_2^+ . С увеличением высоты преобладающим становится ион O^+ . Существенно, что ночная ионосфера состоит из тех же ионов, что и дневная (ср. рис. 6, 7). В большинстве измерений в ночной ионосфере проявляется уже отмечавшаяся выше нерегулярность, примером которой является провал в n_i , наблюдающийся на рис. 7 в окрестности 230 км [19].

в) Перенос плазмы из дневной ионосферы. О наличии горизонтального переноса плазмы в ионосфере Венеры свидетельствуют данные двух экспериментов: OIMS [19] и ORPA [22]. Согласно этим данным, скорости конвективного переноса плазмы могут быть достаточно велики, возрастая от величин $\lesssim 1$ км/с на высотах $\lesssim 200$ км до нескольких километров в секунду на больших высотах. На различных высотах вынос плазмы из дневной ионосферы по-видимому определяется следующими факторами: вязкоподобным взаимодействием с солнечным ветром в окрестности ионопаузы [24], градиентом плотности ионов у терминатора [25], ветрами в нейтральной атмосфере, увлекающими ионы на низких высотах.

В настоящее время трудно судить о надежности определения переносной скорости плазмы V_c в обоих экспериментах, поскольку по существу не опубликована методика таких определений и используемые первичные экспериментальные данные. Не ясно, учитывался ли потенциал спутника при определении V_c по данным OIMS. В [22] утверждается, что эта величина была известна с точностью $\pm 0,1$ В, что представляется довольно оптимистичным. Кроме того, потенциал спутника определялся в другом режиме работы ORPA не одновременно с измерениями кривых торможения ионов. Последние для каждого определения V_c измерялись в трех точках траектории спутника, разнесенных в пространстве на ~ 200 км. В условиях быстро и непредсказуемым образом изменяющейся ночной ионосферы такие измерения становятся неопределенными [26].

Тем не менее сам факт присутствия в ионосфере конвективных движений плазмы и порядки величин наблюдавшихся там иногда скоростей сомнений не вызывает.

Скорости конвекции плазмы и высоты ионопаузы в окрестности терминатора обычно используются для оценки потоков ионов O^+ , переносимых в ночную ионосферу Венеры. Оценки перенесенного потока ионов впоследствии используются для расчета диффузионного потока ионов O^+ вниз над ночной стороной Венеры [19, 22]. Однако дальнейшая судьба ионов, перенесенных с дневной стороны планеты, неизвестна и использование предположения, что существенная часть конвектируемых ионов продиффундирует именно вниз над всей ночной стороной планеты, по-видимому, является переупрощением задачи.

4. Нестационарные и мелкомасштабные явления в ионосфере Венеры.

Выше рассматривались в основном крупномасштабные явления, характеризующие ионосферу в целом. Однако прямые измерения в ионосфере выявили и ряд интересных явлений более мелкого масштаба, некоторые из них несомненно оказывают влияние и на глобальные характеристики ионосферы.

В окрестности дневной ионопаузы часто наблюдались волноподобные нерегулярности ионосферной плазмы, которые были интерпретированы в [11, 27] как поверхностные волны на ионопаузе. С этими волнами могут быть связаны и регистрируемые выше ионопаузы облака плазмы [11, 20], подобной ионосферной плазме. Они, по-видимому, представляют собой следующую стадию развития процесса потерь ионосферной плазмы при ее взаимодействии с солнечным ветром. Магнитное поле огибает плазменные облака и способствует их ускорению [28].

Другим следствием волновых процессов в окрестности магнитопаузы могут быть наблюдаемые в дневной ионосфере Венеры магнитные жгуты [29]. Характерный масштаб этих образований в нижней ионосфере $10\div 20$ км несколько возрастает с увеличением высоты, где появление закрученных в жгут магнитных полей сопровождается падением концентрации плазмы. Какое-либо регулярное магнитное поле в 70% случаев наблюдений в ионосфере Венеры отсутствовало [30].

С измерениями магнитного поля связано еще одно образование — магнитный пояс в дневной ионосфере Венеры, представляющий собой крупномасштабную область с устойчивым горизонтальным магнитным полем величиной, часто превышающей 100γ иногда наблюдаемой в нижней ионосфере при $z \leq 50^\circ$ [30, 31]. Появление крупномасштабных полей коррелирует с периодами больших динамических давлений солнечного ветра. В отличие от [32] авторы магнитных измерений считают магнитный пояс не стационарным образованием, а медленно затухающим на низких высотах остатком интенсивных магнитных полей, образующихся там при очень большом динамическом давлении солнечного ветра и остающихся на некоторое время после его уменьшения [31]. Однако объяснить большую часть явлений, связанных с наблюдениями сильных магнитных полей в ионосфере, по-видимому, можно и более традиционным образом, предположив, что они являются результатом немонотонного изменения расстояния между магнитным барьером и спутником во время движения последнего через ионосферу. Такое немонотонное изменение положения спутника относительно ионопаузы может быть вызвано, например, изменениями динамического давления солнечного ветра, особой формой ионопаузы при больших динамических давлениях, крупномасштабными волновыми изменениями ее формы в таких условиях и т. п.

Оценки показывают [33] во всяком случае, что присутствие как крупномасштабного поля магнитного пояса, так и магнитных жгутов не влияют на вертикальную диффузию плазмы и распределение n_e и электронной температуры T_e на высотах ≤ 200 км в области, где велики соударения частиц.

В ночной ионосфере нестационарные явления выражены ярче, чем в дневной. Первые же измерения в ночной ионосфере обнаружили, что иногда верхняя ночная ионосфера практически полностью исчезает вплоть до высоты ~ 170 км [18]. В это время концентрация ионов в ней на 3—4 порядка величины меньше, чем в случае «нормальной» ночной ионосферы. Однако по данным радиозатменных измерений (проведенных, правда, на другой широте), и в случае «исчезнувшей» верхней ионосферы, концентрация плазмы в окрестности максимума ионизации изменяется мало. Например, в случае наблюдений исчезнувшей вверху ионосферы [18] в окрестности главного и нижнего максимумов ионизации концентрация электронов была соответственно $n_{em} = 10^4 \text{ см}^{-3}$, $n_{el} \simeq 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, т. е. близкой к обычно регистрируемым в этой области значениям (см. рис. 3)

[26]. Отмеченная «независимость» изменений концентрации плазмы в верхней и нижней частях ночной ионосферы может служить одним из косвенных, но убедительных аргументов в «пользу» того, что их формирование обеспечивается различными источниками ионизации и происходит в различных физических условиях: в верхней ночной ионосфере существенны динамические процессы переноса плазмы с дневной стороны планеты, а в окрестности h_m — по-видимому, столкновительная ионизация высыпающимися электронами (см. п. 5).

На некоторых пролетах спутника «Пионер-Венера» в ночной ионосфере была выявлена ее пространственная неоднородность, связанная с наличием в этой области горизонтальных слоев плазмы и провалов концентрации плазмы — так называемые дыры [11]. Горизонтальные слои имеют значительную протяженность, поскольку наблюдаются на двух участках орбиты спутника, отстоящих на несколько тысяч километров друг от друга при входе в ионосферу и выходе из нее [11].

Дыры в ночной ионосфере, по-видимому, являются наиболее устойчивым образованием в ней [34]. Это парные крупномасштабные особенности с характерным размером ~ 1000 км, пронизывающие ионосферу вплоть до самых низких высот, содержащие практически вертикальное и усиленное по сравнению с окружающими районами магнитное поле [34, 35]. Дыры, по-видимому, представляют собой области, откуда происходит интенсивный вынос ионосферной плазмы и куда проникают ускоренные электроны их магнитного хвоста, разогревающие электронный газ до высоких температур, достигающих $\sim 20\,000^\circ$ [36].

5. Моделирование ионосферных процессов. Все опубликованные до настоящего времени теоретические модели ионосферы Венеры являются одномерными, за исключением расчетов в [37] и [38], где сделаны попытки учесть влияние горизонтальных градиентов ионосферных параметров на высотные профили ионизации. Одномерный характер моделей ионосферы позволяет отдельно обсуждать результаты моделирования дневной и ночной ионосфер.

Главным источником ионов в дневной ионосфере Венеры является ультрафиолетовое излучение Солнца. Ионы, образовавшиеся в результате фотоионизации (и вторичной ионизации фотоэлектронами) в области главного максимума ионизации, участвуя в ряде ионно-молекулярных реакций в конце концов рекомбинируют с электронами.

Выше $180\div 200$ км в дневной ионосфере Венеры условия фотохимического равновесия нарушаются, становятся существенными нелокальные процессы диффузии, и расчеты высотных профилей различных ионов обычно проводятся в диффузионном приближении [5, 39–41].

Результаты сравнения расчетных профилей $n_i(h)$ и экспериментальных данных свидетельствуют, что в целом достигнуто понимание химических и физических процессов, контролирующих высотное распределение ионов в дневной ионосфере Венеры ниже ионопаузы, хотя многие важные детали требуют дальнейшего уточнения. Отметим только, что упоминавшееся в п. 3б увеличение в 1,63 раза концентрации в модели нейтральной атмосферы [23] несколько улучшает согласие проведенных в [41, 42] расчетов (см. рис. 6) с экспериментальными данными, и в одной из последних моделей дневной ионосферы [43] Венеры совместно рассматриваются химические и диффузионные процессы для нейтральной и заряженной составляющих атмосферы планеты.

Модельные расчеты, упомянутые выше, разумеется не применимы вблизи ионопаузы и терминатора, где начинают играть роль эффекты конвективного переноса плазмы. Квазидвухмерной является модель [37], применимая в узкой области около терминатора $80^\circ \leq z \leq 100^\circ$. В ней рассматриваются горизонтальные скорости плазмы в этой области, возникающие из-за градиента давления плазмы в ней. Однако модель [37] из-за

многих упрощающих предположений носит скорее качественный, чем количественный характер.

В эмпирической модели [44] сделаны оценки скорости переноса ионов из дневной ионосферы в ночную через терминатор за счет градиентов w_e , взятых из усредненной модели этого параметра. Оценки показали, что скорость ионов возрастает от значений скорости ветра в нейтральной атмосфере (~ 300 м/с) на высоте 150 км до 2 км/с на высотах более 500 км, что не противоречит измерениям [22].

До настоящего времени все модельные расчеты ночной ионосферы Венеры проводились практически аналогично расчетам дневной ионосферы, т. е. с учетом химических процессов и диффузии. Такое приближение, по-видимому, несправедливо уже выше нескольких десятков километров над главным максимумом ионизации h_m , где существенную роль начинают играть нестационарные процессы и конвективный перенос плазмы. Для глобального описания сверхзвуковых потоков плазмы в верхней ночной ионосфере необходимы совершенно другие уравнения; работы в этом направлении не проводились и вряд ли имеются основания для каких-либо физических выводов из сравнения изменчивых (особенно в этой области) результатов плазменных измерений с расчетами, выполненными в диффузионном приближении.

В окрестности h_m модельные расчеты ночной ионосферы становятся более обоснованными с физической точки зрения. От аналогичных расчетов в дневной ионосфере они отличаются природой источника ионизации. Однако и в этой области количественное сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными малоинформативно, поскольку почти всегда согласие с изменчивыми в широких пределах экспериментальными сведениями о ночной ионосфере (см. п. 1 и 4) и атмосфере Венеры может быть достигнуто за счет выбора параметров также изменчивых источников ионизации. Так, например, хорошее согласие модельного распределения в [45] с некоторыми экспериментальными профилями $n_e(h)$ не является информативным, поскольку было получено путем подбора для расчета каждого отдельного модельного $n_e(h)$ -профиля специальных довольно экзотических, хотя и лежащих в пределах разброса экспериментальных данных, высотных распределений электронной и нейтральной температур. Представляется более целесообразным в настоящее время основное внимание уделить выяснению роли тех или иных источников ионизации в различных частях ночной ионосферы.

Первый эффективно действующий источник ионизации ночной ионосферы Венеры был обнаружен в процессе измерений потоков электронов с энергией в несколько десятков электронвольт в оптической тени планеты на спутниках «Венера-9,-10» [46, 47]. Проведенные в [48–50] расчеты ударной ионизации электронами атмосферы Венеры и выявленная корреляция между n_{em} и потоками ионизирующих электронов j_e позволили сделать вывод [51, 52], что обнаруженные на «Венере-9,-10» потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт ответственны за формирование главного максимума ионизации ночной ионосферы Венеры.

На рис. 8 точками показаны все измеренные на спутниках «Венера-9,-10» значения интегральных электронных потоков j_e в оптической тени Венеры при четырех значениях тормозящего напряжения 20, 40, 80 и 150 В широкоугольного анализатора с тормозящим потенциалом [52]. Как можно видеть из этого рисунка, разброс значений j_e за все время измерений составлял 2 порядка величины. Этот разброс качественно соответствует наблюдававшемуся разбросу значений n_{em} , составляющему ~ 1 порядка величины (рис. 3), поскольку $n_{em} \sim \sqrt{j_e}$.

Тонкой ломаной линией на рис. 8 показан энергетический спектр электронов, измеренный 28.X.1975 г. на спутнике «Венера-9,-10» при $z=142^\circ$. Результаты расчета $n_e(h)$ -профиля, сформированного в результа-

те воздействия таких электронов на атмосферу Венеры (данные о ночной атмосфере брались из работы [53]), показаны на рис. 2 штриховой линией [54]. Очевидно, сходство расчетного и радиозатменного профиля $n_e(h)$, полученного в этот же день 11 мин позже при $z=150^\circ$.

Сходные с измеренными на «Венере-9,-10» потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт были зарегистрированы при помощи еще двух независимых приборов на спутнике «Пионер-Венера» непосредственно в ионосфере Венеры [55, 56]. Типичный спектр электронов в ночной ионосфере Венеры ($h=244$ км, $z=125^\circ$) по данным ORPA [56] показан на рис. 8 жирной линией. Для удобства сравнения данные обоих экспериментов представлены в виде всенаправленных потоков

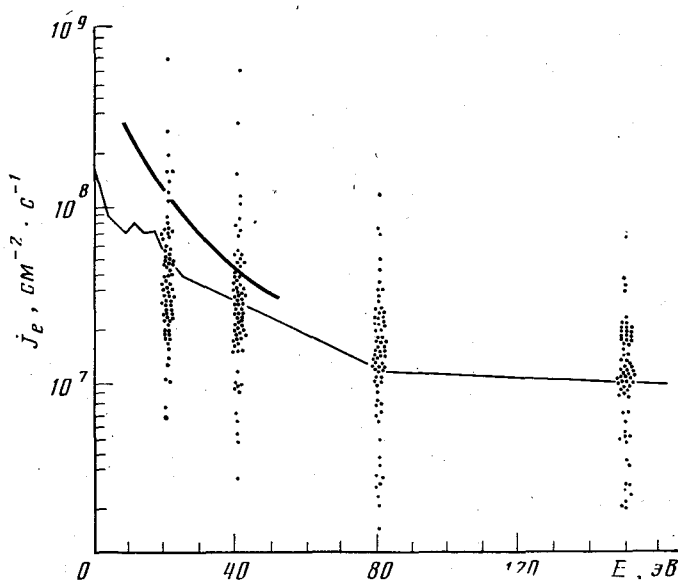


Рис. 8. Потоки электронов для четырех выбранных значений тормозящего потенциала, измеренные в оптической тени Венеры, на спутниках «Венера-9, -10» [52] на расстоянии ≥ 1000 км от ее границы в интервале высот $1200 \leq h \leq 2000$ км

(в 4 раза больших), как это было сделано в работе [52]. Зависимости величины электронных потоков от высоты, а также существенной их анизотропии не обнаружено [56].

Таким образом, надежно установлено, что потоки высыпающихся в ночную ионосферу электронов являются источником ее ионизации, который может сформировать $n_e(h)$ -профиль, сходный с наблюдающимися в радиозатменных экспериментах в окрестности h_m . Эти потоки, по-видимому, поступают в ночную верхнюю атмосферу Венеры из хвоста ее магнитосферы [54] и являются одним из проявлений магнитосферно-ионосферного взаимодействия у Венеры. Отметим также, что рассчитанная в модели [38] вертикальная интенсивность свечения атомного кислорода (1304 \AA), равная 10 R , создаваемая высыпающимися в ночную ионосферу электронами, согласуется с типичными величинами интенсивности свечения по данным UV-спектрометра на спутнике «Пионер-Венера» [57].

Другой источник, поддерживающий ночную ионосферу Венеры, был предложен после проведения масс-спектрометрических измерений на спутнике «Пионер-Венера» [53]. Таким источником ионизации могут быть ионы O^+ , переносимые с дневной стороны планеты на высотах ≥ 200 км. Диффундируя вниз, ионы O^+ вступают в ионно-молекулярную

реакцию с CO_2 , образуя ионы O_2^+ , преобладающие в главном максимуме ионизации.

В [56] считается, что перенос O^+ является преобладающим источником формирования главного максимума ионизации в ночной ионосфере. Модельные расчеты ночной ионосферы, связанные с этим источником ионизации, однако, опираются на неопределенные оценки величины потока ионов O^+ через терминатор. Дальнейшая судьба этих ионов и величина их диффузионного потока вниз, в плотные слои ночной атмосферы, в эксперименте не определялась. Методические ошибки работы [56] подробно обсуждаются в [52].

В п. 4 отмечалось, что в случае наблюдения «исчезающей» верхней ионосферы Венеры концентрация плазмы в этой области оказывалась на

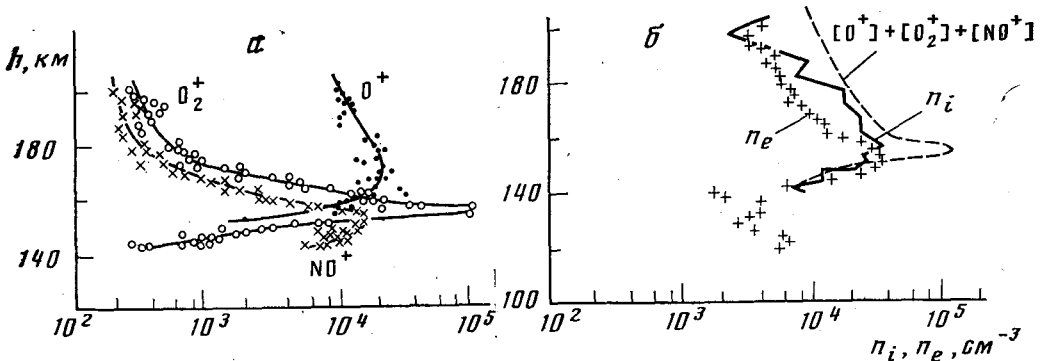


Рис. 9. Распределения заряженных частиц в окрестности ночного максимума ионизации ионосферы Венеры.

а — распределение отдельных ионных компонентов по данным масс-спектрометра (OIMS) на спутнике «Пионер-Венера», полученное ночью для витка 58 [26].

б — суммарная концентрация ионов n_i по данным OIMS (сплошная кривая) для того же пролета аппарата [26]; n_e — по радиозатменным данным (крестики); суммарная концентрация ионов $[\text{O}^+] + [\text{O}_2^+] + [\text{NO}^+]$, построенная по данным, представленным на рис. 1, а (пунктир)

3÷4 порядка меньше, чем в установившемся случае. По-видимому, в таких же или больших пределах может изменяться и диффузионный поток ионов O^+ вниз. Таким образом, этот источник ионизации оказывается «слишком изменчивым» для того, чтобы определять концентрацию n_{em} в окрестности h_m , где ее характерные вариации составляют всего один порядок величины (рис. 3). Статистическое исследование вариаций потоков энергичных электронов и основных ионов в ночной ионосфере Венеры проведено в работах [58, 59].

Качественные отличия высотных профилей различных ионов в окрестности h_m в случаях, когда в этой области преобладает один из упомянутых выше источников ионизации, сводятся к следующим. Если диффундирующие вниз ионы O^+ являются единственным источником ионов O_2^+ , то высотные профили обоих ионов должны быть жестко «связаны» между собой, причем максимум концентрации O_2^+ должен наблюдаться на фоне резкого спада концентрации O^+ . Поскольку характерным масштабом для потерь O^+ и образования O_2^+ является шкала высот основного нейтрального компонента (углекислого газа H_{CO_2}) 3 км, то максимумы высотных профилей обоих ионов могут отстоять друг от друга на расстоянии порядка нескольких шкал высот CO_2 [52]. Очевидно также, что формирование главного максимума ионизации в этом случае происходит в условиях диффузионного, а не химического равновесия (слой F_2).

Если же ответственными за формирование главного максимума O_2^+ являются потоки ионизирующих электронов, то в окрестности выполня-

ются условия химического равновесия (слой F_1), приводящие к неограниченному росту концентрации O^+ с увеличением высоты h . Однако с увеличением h преобладающую роль приобретают диффузионные процессы и максимум O^+ формируется уже в условиях диффузионного равновесия. В таком случае расстояние между максимумами O^+ и O_2^+ уже не определяется шкалой высот CO_2 и может быть существенно больше, чем в первом случае.

В работе [26] опубликованы детальные масс-спектрометрические измерения состава ионов в окрестности ночной ионосферы в двух пролетах спутника «Пионер-Венера» через эту область. На рис. 9, а плавные кривые проведены по экспериментальным точкам, взятым из рис. 5 упомянутой работы. Как можно видеть, расстояние между максимумами концентраций иона O_2^+ и O^+ составляло 15 км, т. е. $5 H_{CO_2}$. Приблизительно таким же было расстояние между максимумами O^+ и O_2^+ и в другом, рассмотренном в [26], случае (см. также рис. 7). Такие расстояния между максимумами концентрации ионов O^+ и O_2^+ , по-видимому, являются аргументом в пользу того, что главный максимум ионизации создан выходящими электронами.

Другой качественной особенностью приведенных на рис. 9, а высотных профилей ионов, является увеличение шкалы высот ионов O_2^+ и O^+ на высотах 170–180 км, т. е. в окрестности максимума O^+ . Отмеченное изменение шкалы высот ионов O_2^+ и O^+ , по-видимому, свидетельствует о переходе от химического к диффузионному равновесию в окрестности максимума иона O^+ . В этом случае максимум ионизации O_2^+ находится в условиях химического равновесия, что, как указывалось выше, может являться качественным свидетельством в пользу преобладающей роли механизма ударной ионизации электронами в окрестности h_m . Разумеется с увеличением высоты более существенную роль приобретают нестационарные процессы и конвективный перенос плазмы, и становится более существенным участие ионов O^+ , перенесенных с дневной стороны планеты, в формировании ночной ионосферы (см. п. 4).

Оба рассмотренных выше источника ионизации не эффективны в области высот $h < h_m$. Для объяснения нижнего максимума необходимо привлечение других источников ионизации. В качестве таких источников ионизации предлагались, например потоки энергичных ионов из плазменного слоя [54], потоки более энергичных электронов [7] и т. д.

В [26] для объяснения очень высоких концентраций $O_2^+ \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $O^+ \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ в окрестности h_m по данным масс-спектрометрических измерений (OIMS) (рис. 9, а) предположили необходимость неких дополнительных механизмов ионизации в ночной ионосфере. В той же работе, однако, сравнивая те же результаты масс-спектрометрических измерений (рис. 9, б, ломаная кривая) с данными радиозатменных измерений (крестики на рис. 9, б) авторы приходят к выводу об их разумном согласии. Как можно видеть на рис. 9, б, где штриховой линией показана суммарная концентрация ионов, построенная по данным [26], представленным на рис. 9, а, масс-спектрометрические и радиозатменные данные в действительности расходятся в 3–4 раза. По-видимому, как уже отмечалось выше в п. 3, до выяснения причин расхождения данных прямых и радиозатменных измерений при построении физических моделей следует пользоваться количественными результатами с большой осторожностью.

Заключение

Данные экспериментальных измерений в ночной и дневной ионосфере Венеры имеют существенный разброс как по методическим, так и по естественным, физическим причинам. Поэтому, хотя качественное поведение ионосферы Венеры (особенно ее дневной части) описывается вполне удовлетворительно, количественные описания ее представляются недо-

статочны надежными. Не окончательно выяснен вопрос об источниках ионизации и механизмах формирования ночной ионосферы. Однако ясно, что, так как факт существования ионизирующих потоков электронов с энергиями порядка нескольких десятков электронвольт в ночной ионосфере Венеры надежно установлен как советскими [48–52], так и американскими [55, 56, 68] измерениями, и величина этих потоков достаточна для создания в окрестности h_m электронных концентраций, сопоставимых с наблюдаемыми, то любая модель ночной ионосферы Венеры должна учитывать действие указанных электронных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Ю. Н., Васильев М. Б., Вышков А. С. и др. Предварительные результаты двухчастотного радиопросвечивания дневной ионосферы при помощи спутников «Венера-9» и «Венера-10». — Космич. исслед., 1976, т. 14, № 6, с. 819.
2. Александров Ю. Н., Васильев М. Б., Вышков А. С. и др. Ночная ионосфера Венеры по результатам двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников «Венера-9 и -10». — Космич. исслед., 1976, т. 14, № 6, с. 824.
3. Ivanov-Kholodny G. S., Kolosov M. A., Savich N. A. et al. Daytime ionosphere of Venus as studied with Venera 9 and 10 dual-frequency radio occultation experiment. — Icarus, 1979, v. 39, p. 209.
4. Gavric A. L., Ivanov-Kholodny G. S., Mihalov A. V. et al. The formation of the daytime Venusian ionosphere. The results of dual-frequency occultation experiments. — In: Space Research XX, 1980. Oxford: Pergamon, p. 231.
5. Gavric A. L., Savich N. A., Samoznaev L. N. The analyzes of diffusion processes in the daytime ionosphere of Venus resting on the Venera 9, 10 radio occultation data. — In: Proceedings of the Thirteenth International Symposium of Space Technology and Science, Tokyo, 1982, p. 1551.
6. Cravens T. E., Kliore A. J., Kozyra J. U., Nagy A. F. The ionospheric peak on the Venus dayside. — J. Geophys. Res., 1981, v. 86, p. 1323.
7. Kliore A. J., Patel I. R., Nagy A. F. et al. Initial observations of the night-time ionosphere of Venus from Pioneer Venus orbiter radio occultations. — Science, 1979, v. 205, p. 99.
8. Chapman S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere of rotating Earth. II. Grating incidence. — Proc. Phys. Soc., 1931, v. 43, p. 483.
9. Kliore A. J. The ionosphere main peak: behavior with solar zenith angle. — In: An International conference of the Venus environment, Hyaat Rickeyes, Palo Alto, California, 1981, nov. 1–6, p. 74.
10. Mariner Stanford Group. Venus: Ionosphere and atmosphere as measured by dual frequency occultation on Mariner 5. — Science, 1967, v. 158, p. 1678.
11. Brace L. H., Theis R. F., Hoegy W. R. et al. The dynamic behavior of the Venus ionosphere in response to solar wind interactions. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7663.
12. Elphic R. C., Russell C. T., Slavin J. A., Brace L. H. Observations of the dayside ionopause and ionosphere of Venus. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7679a.
13. Elphic R. C., Russel C. T., Slavin J. A. et al. The location of the dayside ionopause of Venus: Pioneer Venus Orbiter magnetometer observations. — Geophys. Res. Lett., 1980, v. 7, p. 561.
14. Vaisberg O. L., Intrilligator D. S., Smirnov V. N. An empirical model of the Venusian outer environment. I. The shape of the dayside solar wind ionosphere interface. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7642.
15. Brace L. H. et al. On configuration of the night side Venus ionopause. — Geophys. Res. Lett., 1979, v. 6, p. 345.
16. Грингауз К. И., Бреус Т. К. Сравнительные характеристики ионосфер планет земной группы — Марса, Венеры и Земли. — Космич. исслед., 1969, т. 7, с. 871.
17. Taylor H. A., Brinton H. C., Bauer S. J. et al. Ionosphere of Venus: First observations of the dayside ion compositions near dawn and dusk. — Science, 1979, v. 203, p. 752.
18. Taylor H. A., Brinton H. C., Bauer S. J. et al. Ionosphere of Venus: First observations of day-night variations of the ion composition. — Science, 1979, v. 205, p. 96.
19. Taylor H. A., Brinton H. C., Bauer S. J. et al. Global observations of the composition and dynamics of the ionosphere of Venus: Implications for the solar wind interaction. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7765.
20. Knudsen W. C., Spenner K., Whitten R. C. et al. Thermal structure and major ion composition of the Venus ionosphere: First RPA results from Venus orbiter. — Science, 1979, v. 203, p. 757.
21. Knudsen W. C., Spenner K., Whitten R. C. et al. Thermal structure and energy influx to the day and nightside Venus ionosphere. — Science, 1979, v. 205, p. 105.

22. Knudsen W. C., Spenner K., Miller K. L. et al. Transport of ionospheric O⁺ ions across the Venus terminator and implications.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7803.
23. Hedin A. E., Niemann H. B., Kasprzak W. T., Seiff A. Global empirical model of the Venus thermosphere.— J. Geophys. Res., 1983, v. 88, p. 73.
24. Perez-de-Tejada H. Viscous flow circulation of the shocked solar wind behind Venus.— Science, 1980, v. 207, p. 981.
25. Knudsen W. C., Spenner K., Miller K. L. Antisolar acceleration of ionospheric plasma across the Venus terminator.— Geophys. Res. Lett., 1981, v. 8, p. 241.
26. Taylor H. A., Jr., Hartle R. E., Niemann H. B. et al. Observed composition of the ionosphere of Venus. Implications for the ionization peak and maintenance of the nightside ionosphere.— Icarus, 1982, v. 51, p. 283.
27. Brace L. H., Theis R. F., Hoegy W. P. Plasma clouds above the ionopause of Venus and their implications.— Planet. Space Sci., 1982, v. 30, p. 29.
28. Russell C. T., Luhman J. G., Elphic R. C. et al. Magnetic field and plasma waves observations in a plasma cloud at Venus.— Geophys. Res. Lett., 1982, v. 9, p. 45.
29. Russell C. T., Elphic R. C. Observations of flux ropes of the Venus ionosphere.— Nature, 1979, v. 279, p. 616.
30. Luhman J. G., Elphic R. C., Russell C. T. et al. Observations of large scale steady magnetic fields in the dayside Venus ionosphere.— Geophys. Res. Lett., 1982, v. 7, p. 917.
31. Luhman J. G., Russell C. T., Elphic R. C. Time scales, for the Venus ionosphere.— J. Geophys. Res., 1984, v. 89, p. 362.
32. Cloutier P. A., Tascione R. F., Daniell R. E. An electrodynamic model of electric currents and magnetic fields in the dayside ionosphere of Venus.— Planet. Space science, 1981, v. 29, p. 635.
33. Elphic R. C., Brace L. M., Theis R. F. Venus dayside ionospheric conditions: effects of ionospheric magnetic field and solar wind EUV flux.— Geophys. Res. Lett., 1984, v. 11, p. 124.
34. Brace L. H., Theis R. F., Mayr H. G. et al. Holes in the nightside ionosphere of Venus.— J. Geophys. Res., 1982, v. 87, p. 199.
35. Luhman J. G., Elphic R. C., Russell C. T. et al. Observations of large scale steady magnetic fields in the nightside Venus ionosphere and near wake.— Geophys. Res. Lett., 1981, p. 517.
36. Nagy A. F., Cravens T. E., Gombosi T. I. Basic theory and model calculations of the Venus ionosphere.— In: Venus/Eds Hunten D. M., Colin L., Donahue T. M., Moroz V. I. Tucson: Univer. of Arizona press, p. 841.
37. Whittenn R. C., Baldwin B., Knudsen W. C. The Venus ionosphere at grazing incidence of solar radiation: Transport of plasma to the night ionosphere.— Icarus, 1982, v. 51, p. 261.
38. Cravens T. E., Crawford S. L., Nagy A. F., Gombosi T. I. A two dimensional model of the ionosphere of Venus.— J. Geophys. Res., 1983, v. 88, p. 5595.
39. Bauer S. J., Donahue T. M., Hartle R. E., Taylor H. A., Jr. Venus ionosphere: Photochemical and thermal diffusion control of ion composition.— Science, 1979, v. 205, p. 109.
40. Nagy A. F., Cravens T. E., Chen R. H. et al. Comparison of calculated and measured ion densities on the dayside of Venus.— Science, 1979, v. 205, p. 107.
41. Nagy A. F., Cravens T. E., Smith S. G. et al. Model calculations of the dayside of Venus.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, p. 7795.
42. Паков М. Н., Красицкий О. П., Павлов А. В. Модель ионного состава дневной ионосферы Венеры.— Космич. исслед., 1981, т. 19, с. 733.
43. Shimazaki T., Whitten R. C., Woodward H. T. et al. The dayside Venus ionosphere. II. Combined numerical model of ion neutral composition above 120 km.— Icarus, 1984, v. 60, p. 654.
44. Theis K. T., Brace L. H., Elphic R. C., Mayr H. G. New empirical model of the electron temperature and density in the Venus ionosphere with application to trans-termination flow.— J. Geophys. Res., 1984, v. 83, p. 1477.
45. Осмоловский И. К., Савич Н. А., Самознаев Л. Н. Двухслойная модель образования ночной ионосферы Венеры по данным радиозатменных экспериментов.— Докл. АН СССР, 1984, т. 276, с. 325.
46. Грингауз К. И., Безруких В. В., Бреус Т. К. и др. Предварительные результаты измерений плазмы при помощи широкоугольных приборов на спутниках «Венера-9» и «Венера-10».— Космич. исслед., 1976, т. 14, с. 839.
47. Gringauz K. I., Bezrukikh V. V., Breus T. K. et al. Plasma observations near Venus on board the Venera-9, -10 satellites by means of wide-angle plasma detectors.— In: Physics of Solar planetary environments/Ed. Williams D. Y.— AGU Boulder, Colorado, 1976, p. 918.
48. Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T. I. Electron fluxes measured on board Venera-9 and Venera-10 in the optical umbra of Venus: main ionization source in Venus nighttime ionosphere. Preprint PR-303. Space Res. Institute, Moscow: Academy of Science of the USSR, 1976.
49. Грингауз К. И., Веригин М. И., Бреус Т. К., Гамбоши Т. Электронные потоки, измеренные в оптической тени Венеры на спутниках «Венера-9» и «Венера-10»,

- основной источник ионизации в ночной ионосфере Венеры.— Докл. АН СССР, 1977, т. 232, № 5, с. 1039.
50. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T. I.* The interaction of the solar wind electrons in the optical umbra of Venus with the planetary atmosphere — the origin of the nighttime ionosphere. Preprint D-250. Space Res. Institute. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1977.
 51. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T. I.* The interaction of electrons in the optical umbra of the Venus with the planetary atmosphere.— J. Geophys. Res., 1979, v. 84, p. 2123.
 52. *Грингауз К. И., Веригин М. И., Бреус Т. К., Швачунова Л. А.* О преобладающем источнике ионизации в главном максимуме ночной ионосферы Венеры.— Космич. исслед., 1983, с. 746.
 53. *Niemann H. B., Hartle R. E., Hedin A. E.* Venus upper atmosphere neutral gas composition: First observations of the diurnal variation.— Science, 1979, v. 205, p. 54.
 54. *Грингауз К. И., Веригин М. И., Бреус Т. К., Иванова С. В.* Малоэнергичные электроны в оптической тени Венеры, обнаруженные на спутниках «Венера-9, -10» — источник ночной ионосферы. Сравнение с результатами спутника «Пионер-Венера», — Космич. исслед., 1981, т. 19, с. 430.
 55. *Intrilligator D. S., Collard H. R., Mihalov J. D.* Electron observations and ion flows from the Pioneer Venus orbiter plasma analyser experiment.— Science, 1979, v. 205, p. 116.
 56. *Spenner K., Knudsen W. C., Whitten R. C.* On the maintenance of the Venus nighttime ionosphere: Electron precipitation and plasma transport.— J. Geophys. Res., 1981, v. 86, p. 9170.
 57. *Stewart A. I. F.* A search for Venusian auroral ultraviolet emission, paper presented at 24 th COSPAR Meeting, Ottawa, Canada, 1982.
 58. *Knudsen W. C., Miller K. L.* Pioneer Venus suprathermal electron flux measurements in the Venus umbra.— J. Geophys. Res., 1985, v. 90, p. 2695.
 59. *Knudsen W. C., Miller K. L.* The nightside Venus ionosphere.— J. Geophys. Res., 1985, v. 90.

Поступила в редакцию
22.V.1985