

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

# КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XXI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

---

МОСКВА · 1983

3. *Hartle R. E., Taylor H. A. et al.* Dynamical response of dayside ionosphere of Venus to the Solar wind.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7739.
4. *Nagy A. F., Cravens T. E., Smith S. G. et al.* Model calculation of the dayside ionosphere of Venus: ionic composition.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7795.
5. *Savich N. A.* Comparative analysis of venusian ionosphere dual-frequency radio soundings with the satellites «Venera-9, 10» and Pioneer-Venus.— *Adv. Space Res.*, 1981, v. 1, № 1, p. 17.
6. *Kliore A. J., Patel I. R., Nagy A. F. et al.* Initial observations of the nightside ionosphere of Venus from Pioneer Venus Orbiter radio occultations.— *Science*, 1979, v. 205, № 4401, p. 99.
7. *Brace L. H., Theis R. F., Niemann H. B. et al.* Empirical models of the electron temperature and density in the nightside Venus ionosphere.— *Science*, 1979, v. 205, № 4401, p. 102.
8. *Kliore A. J., Woo R., Armstrong J. W. et al.* The polar ionosphere of Venus near the terminator from early Pioneer Venus Orbiter radio occultations.— *Science*, 1979, v. 203, № 4382, p. 765.
9. *Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М.* Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969.
10. *Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В.* Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1980.
11. *Бауэр Э.* Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976.
12. *Вышков А. С., Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В., Савич Н. А.* Интерпретация результатов измерений верхней ионосферы Марса методом дисперсионного интерферометра при помощи станций «Марс-2».— *Космич. исслед.*, 1975, т. 13, вып. 2, с. 249.
13. *Chen R. H., Nagy A. F.* A comprehensive model of Venus ionosphere.— *J. Geophys. Res.*, 1978, v. 83, № A3, p. 1133.
14. *Banks P. M., Kockarts G.* *Aeronomy*. Part B. N. Y.— L.: Acad. Press, 1973.
15. *Иванов-Холодный Г. С., Фирсов В. В.* Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях солнечной активности.— *Геомagnetизм и аэрoномия*, 1974, т. 14, № 3, с. 393.
16. *Лагышев К. С., Бобарыкин Н. Д., Медведев В. В.* Разностные методы решения одномерных магнитогидродинамических уравнений в задачах моделирования ионосферы.— В кн.: *Ионосферные исследования*, вып. № 28. М.: Сов. радио, 1979, с. 37.
17. *Самарский А. А.* Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
18. *Brace L. H., Theis R. F., Krehbiel J. P. et al.* Electron temperatures and densities in the Venus ionosphere: Pioneer Venus Orbiter electron temperature probe results.— *Science*, 1979, v. 203, № 4362, p. 763.
19. *Niemann H. B., Kasprzak W. T., Hedin A. E. et al.* Mass spectrometric measurements of the neutral gas composition of the thermosphere and exosphere of Venus.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7817.
20. *Keating G. M., Nicholson III J. Y., Lake L. R.* Venus upper atmosphere structure.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7941.
21. *Miller K. L., Knudsen W. C., Spenner K. et al.* Solar zenith angle dependence of ionospheric ion and density on Venus.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7759.
22. *Theis R. F., Brace L. H., Mayr H. G.* Empirical models of the electron temperature and density in the Venus ionosphere.— *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, № A13, p. 7787.
23. *Fjeldbo G., Seidel B., Swetnam D., Howard T.* The Mariner-10 radio occultation measurements of the ionosphere of Venus.— *J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, № 6, p. 1232.
24. *Bauer S. J., Hartle R. E.* Venus ionosphere: an interpretation of Mariner-10 observations.— *Geophys. Res. Lett.*, 1974, v. 1, № 1, p. 7.

Поступила в редакцию  
2.II.1982

УДК 523.72:523.42

*К. И. Грингауз, М. И. Веригин, Т. К. Бреус,  
Л. А. Швачунова*

### О ПРЕОБЛАДАЮЩЕМ ИСТОЧНИКЕ ИОНИЗАЦИИ В ГЛАВНОМ МАКСИМУМЕ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

Приводятся новые соображения в пользу высказанной ранее на основе данных со спутников «Венера-9 и 10» гипотезы о том, что электронные потоки являются основным источником ионизации, создающим верхний максимум электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры. Проведен анализ аргументов некоторых американских авторов, предлагающих в качестве основного источника ночной ионизации перенос ионов  $O^+$  из дневной ионосферы Венеры в ночную, и показана неубедительность этих аргументов.

Активно обсуждавшийся в недавнее время вопрос о природе источников ионизации, поддерживающих ночную ионосферу Венеры (см., например, [1–5]), в настоящее время в значительной степени выяснен, хотя вопрос об относительном вкладе различных источников еще дискутируется. Это произошло в результате анализа измерений заряженных частиц на спутниках Венеры «Венера-9», «Венера-10» и «Пионер-Венера». Авторы плазменного эксперимента на «Венере-9, 10», обратив внимание на то, что глубоко в оптической тени планеты на высотах 1500–2000 км всегда и надежно регистрировались потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт, предположили, что именно они и обеспечивают существование главного максимума электронной концентрации ночной ионосферы планеты [6, 7]. Проведенные расчеты ударной ионизации электронами атмосферы Венеры [8, 9] и выявленная корреляция между потоками ионизирующих электронов  $j_e$  и электронной концентрацией  $n_{e, \max}$  в максимуме высотного профиля электронной концентрации ночной ионосферы  $n_e(h)$  позволили сделать вывод [10, 11], что обнаруженные на «Венере-9, 10» потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт ответственны за формирование основного (верхнего) максимума ионизации.

Как было показано в [12, 13], использовавшееся в работах [8–11] предположение, что ионизирующие электроны проникают до высоты главного максимума ионизации  $h_{\max} \approx 140$  км, и следовавший отсюда вывод [10, 11], что истинное значение концентрации нейтральных частиц  $n_n$  на этой высоте  $\sim 2 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup> (в  $\sim 30$  раз меньше, чем  $n_n$  в общепринятых в то время моделях ночной верхней атмосферы Венеры [14, 15]), были подтверждены в результате измерений потоков ионизирующих электронов [16] и нейтрального газа [17] непосредственно в ночной ионосфере на спутнике «Пионер-Венера».

Масс-спектрометрические измерения ионосферной плазмы, проведенные на этом же спутнике [18], легли в основу представлений еще об одном источнике ионизации в ночной атмосфере Венеры. Согласно этим представлениям, перенос ионов  $O^+$  с дневной стороны планеты и их последующая диффузия вниз, в ночную атмосферу, приводят к образованию

ионов  $O_2^+$ , преобладающих в верхнем максимуме ионизации, в результате следующей ионно-молекулярной реакции:  $O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$  [18]. Поэтому в ряде работ [12, 13, 18–24] стал обсуждаться вопрос о том, какой из упоминавшихся выше источников ионизации преобладает в окрестности верхнего главного ионосферного максимума. Следует отметить, что в чрезвычайно изменчивой ночной ионосфере Венеры [19, 25] определенно должны существовать и другие источники ионизации, и для объяснения спорадического нижнего максимума ( $h \approx 120$  км) привлекались, например, потоки энергичных ионов из плазменного слоя [12, 13], обнаруженного на «Венера-9, 10» в хвосте Венеры, потоки энергичных электронов [19] и др.

Прямое, опирающееся только на экспериментальные данные решение вопроса об основном источнике ионизации в ночной ионосфере Венеры в настоящее время не представляется возможным, несмотря на большой объем и кажущуюся полноту измерений, проведенных на спутнике «Пионер-Венера». Анализ опубликованных до 1980 г. результатов измерений заряженных и нейтральных частиц на этом спутнике и на спутниках «Венера-9, 10» позволил авторам работ [12, 13, 24] прийти к выводу, что максимум  $n_e(h)$ -профиля в ночной ионосфере Венеры создается столкновительной ионизацией электронами, а вклад ионов  $O^+$ , перенесенных из дневной ионосферы, может быть существен, по-видимому, только в формировании части этого профиля выше  $h_{\max}$ .

К другому выводу пришли авторы работы [26]. Основываясь на полученных ими новых результатах измерений ионного и электронного компонентов ионосферной плазмы при помощи анализатора с тормозящим потенциалом [23, 26], они заключили, что ионизация и ее изменчивость в окрестности  $h_{\max}$  обеспечиваются в основном за счет переноса  $O^+$  с дневной стороны Венеры, тогда как вклад сверхтепловых электронов сводится к созданию относительно постоянного «фона» на этих высотах. Поскольку в [26] искаженно описаны свойства электронного источника ионизации, сделаны недостаточно обоснованные выводы из сравнения результатов измерений вдоль орбиты концентрации ионов и потоков сверхтепловых электронов и из сравнения модельных расчетов с экспериментальными данными, представляется необходимым еще раз вернуться к проблеме природы источника ионизации в главном максимуме ночной ионосферы Венеры.

**1. Об изменчивости потоков ионизирующих электронов.** Анализируя измеренные на спутнике «Пионер-Венера» при помощи анализатора с тормозящим потенциалом вариации потоков сверхтепловых электронов на высотах  $\geq 180$  км, авторы работы [26] пришли к выводу об их неизменности во времени с точностью до фактора 2. Отсюда следовало, что потоки сверхтепловых электронов не могут быть основным источником изменчивого верхнего максимума ионизации, и их роль сводится к созданию «фоновой» стабильного  $n_e(h)$ -профиля [26]. В подтверждение относительного постоянства во времени потоков ионизирующих электронов авторы [26] привлекали также частично опубликованные в [11] результаты измерений электронных спектров над ночной стороной Венеры на спутниках «Венера-9, 10». Ниже будет показано, что в действительности измерения электронного компонента плазмы в оптической тени Венеры на этих спутниках свидетельствуют о противоположном — о значительной изменчивости во времени потоков ионизирующих электронов.

На спутниках «Венера-9, 10» интегральные энергетические спектры электронов, как и на спутнике «Пионер-Венера», регистрировались при помощи широкоугольного ( $\pm 40^\circ$ ) анализатора с тормозящим потенциалом. На анализирующие сетки датчика, представляющие собой часть сферической поверхности, подавалось 16 значений тормозящего напряжения  $U_T$  в диапазоне  $0 \div 300$  В. При каждом значении  $U_T$  производилось 10 измерений тока электронов на коллектор  $I_e$  с интервалом 1 с и, таким образом, полный интегральный энергетический спектр измерялся за 160 с. По из-

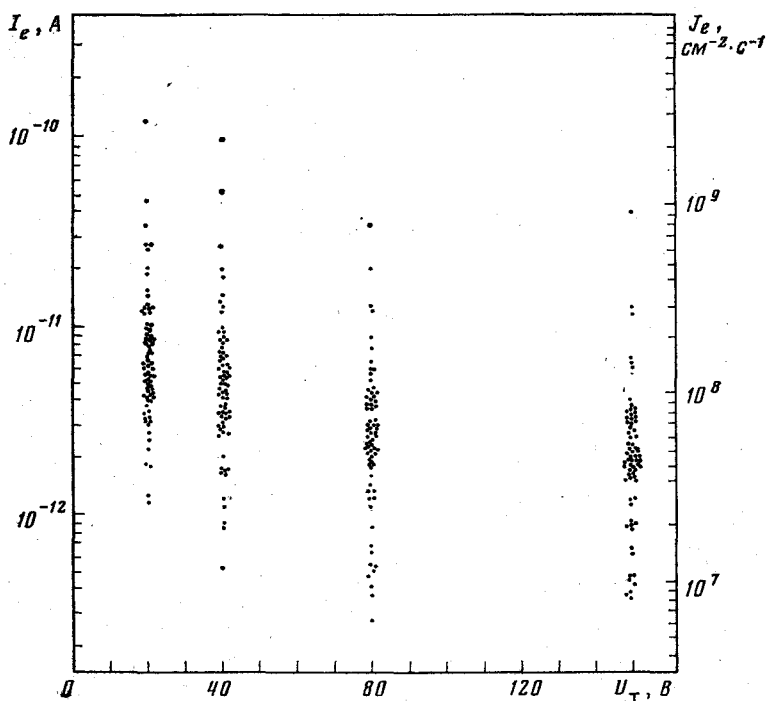


Рис. 1. Средние за 10 с значения коллекторного тока электронного анализатора  $I_e$  и всенаправленного потока электронов  $J_e$  с энергией  $\geq eU_T$  при четырех значениях тормозящего потенциала  $U_T$

Приведены все измерения на «Венере-9, 10» в оптической тени Венеры на расстояниях  $\geq 1000$  км от границы тени на высотах  $\leq 2000$  км над поверхностью планеты

меренным значениям  $I_e$  с учетом приведенных в [27] угловых характеристик электронного датчика и в предположении изотропности функции распределения электронов можно определить значения всенаправленного потока электронов  $j_e(E_e \geq eU_T)$ . Отметим также, что поскольку оси широкоугольных электронных анализаторов были ориентированы в направлении, близком к антисолнечному, глубоко в оптической тени Венеры измерялась только направленная к планете часть электронных потоков.

На рис. 1 приведены все измеренные на спутниках «Венера-9, 10» (в оптической тени Венеры, на расстояниях  $\geq 1000$  км от ее границы и в интервале высот 1200–2000 км) средние за 10 с значения  $I_e$  при четырех значениях тормозящего напряжения  $U_T = 20, 40, 80, 150$  В. Эти измерения были проведены в октябре – декабре 1975 г., причем на каждом витке спутников ( $\sim 2$  сут) в указанной выше области оптической тени планеты могло быть получено не более 3–4 спектров электронов. Как можно видеть из этого рисунка, для всех значений  $U_T$  разброс наблюдавшихся значений  $I_e$  и соответственно разброс значений  $j_e(E_e \geq eU_T)$  за все время измерений составляет  $\sim 2$  порядка величины. Таким образом, измерения электронного компонента плазмы на спутниках «Венера-9, 10», в противоположность утверждению, сделанному в [26], вовсе не поддерживают выводы этой работы о малой изменчивости во времени электронных потоков за Венерой. Даже в приведенной в работе [11] информации о девяти электронных спектрах, измеренных на спутниках «Венера-9, 10» более или менее одновременно с имевшимися в распоряжении авторов этой работы радиозатменными  $n_e(h)$  профилями, уже в двух спектрах потока электронов не лежали в пределах фактора 2 от средних значений [26, 28].

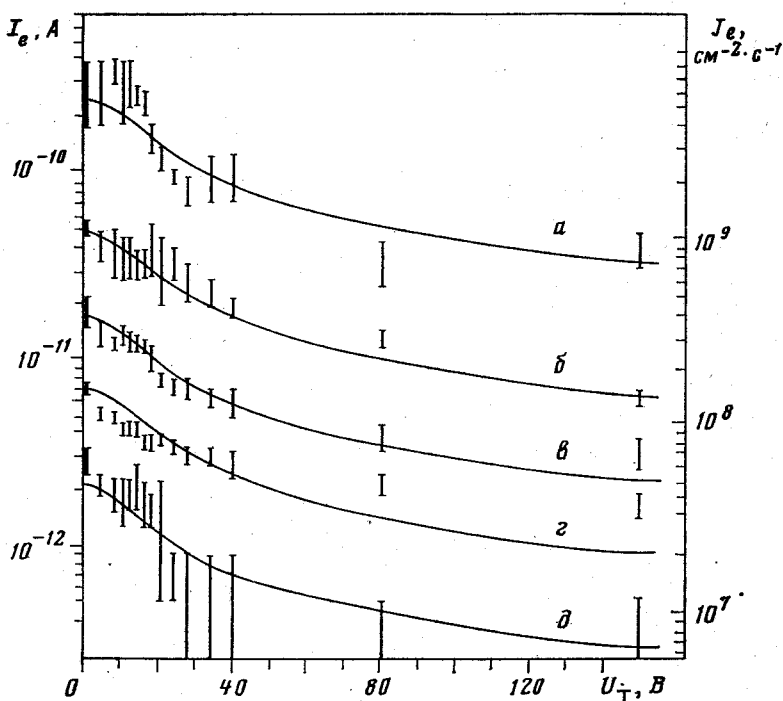


Рис. 2. Примеры электронных спектров, измеренных в оптической тени Венеры при помощи широкоугольного электронного анализатора на спутниках «Венера-9» (а, в, д) и «Венера-10» (б, з) в ноябре 1975 г.

а — 7.XI, 05.25 UT,  $\chi=141^\circ$ ,  $h=1300$  км, б — 22.XI, 22.43 UT,  $\chi=144^\circ$ ,  $h=1900$  км; в — 1.XI, 04.27 UT,  $\chi=140^\circ$ ,  $h=1300$  км; з — 24.XI, 23.59 UT,  $\chi=148^\circ$ ,  $h=1300$  км; д — 29.XI, 09.00 UT,  $\chi=160^\circ$ ,  $h=1400$  км.  $\chi$  — зенитное расстояние Солнца,  $h$  — высота спутника

Показанная выше изменчивость потоков электронов за Венерой (см. рис. 1) в основном отражает их изменения от пролета к пролету. На протяжении же одного пролета в анализируемой здесь части области оптической тени потоки электронов, как правило, изменялись существенно меньше и, например, возрастание  $I_e$  в  $\sim 50$  раз наблюдалось только однажды — 7.XI 1975 г. [28]. Примеры электронных спектров, полученных в различных пролетах в оптической тени Венеры на спутниках «Венера-9, 10», приведены на рис. 2. Отрезками вертикальных прямых на этом рисунке показаны пределы, в которых изменялись электронные потоки за 10 с при фиксированном значении  $U_T$ . Эти электронные спектры, внешне похожие, но отличающиеся друг от друга по потокам на двух порядков величины, были измерены на спутниках «Венера-9, 10» на высотах  $1300 \div 1900$  км. В работе [26] отмечалось, что и на меньших высотах ( $200 \div 1000$  км) по данным анализатора с тормозящим потенциалом, установленного на спутнике «Пионер-Венера», форма электронных спектров в основном такая же, причем величина электронных потоков от высоты не зависит.

Сходство электронных спектров, измеренных на спутниках «Венера-9, 10» и «Пионер-Венера», свидетельствует, что потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт над ночной стороной Венеры во всем интервале высот  $200 \div 2000$  км имеют общий источник.

В таком случае следует ожидать, что величина потоков ионизирующих электронов в ночной ионосфере Венеры также должна варьироваться в широких пределах. Это не согласуется с неоднократно подчеркиваемым в [26] утверждением о неизменности с точностью до фактора 2, потоков сверхтепловых электронов в ночной ионосфере. Причины указанного расхождения недостаточно ясны, поскольку в [26] не описано, как был по-

лучен этот фактор, и не приведено какой-либо информации о максимальных и минимальных измеренных потоках ионизирующих электронов в ночной ионосфере Венеры, о способе отбора данных для анализа изменчивости электронных потоков. Простое сравнение потоков электронов с  $E_e > 45$  эВ в окрестности  $h \approx 300$  км, измеренных в ночной ионосфере на 60-м и 56-м витках спутника «Пионер-Венера» и приведенных соответственно на рис. 3 и 4 в работе [26], показывает, что их величина в обоих случаях отличалась более чем на порядок. Поскольку трудно предположить, что именно в этих случаях на «Пионере-Венера» были зарегистрированы экстремальные потоки электронов, содержащиеся в [26] утверждение о стабильности электронных потоков в ночной ионосфере Венеры представляется недостаточно обоснованным.

Изменчивость потоков ионизирующих электронов, выявленная по измерениям электронного компонента плазмы на спутниках «Венера-9, 10» над ночной стороной планеты (см. рис. 1, 2), вполне соответствует изменчивости  $n_e$  в главном максимуме ночной ионосферы, наблюдавшейся по данным радиозатменных экспериментов [19, 25], и не позволяет на этом основании отвергать электронные потоки в качестве основного источника ионизации в окрестности  $h_{\max}$ .

**2. О корреляции потоков сверхтепловых электронов и концентрации ионов в ионосфере.** Второй аргумент, приводимый в работе [26] в пользу того, что ионы  $O^+$ , перенесенные с дневной стороны Венеры, определяют формирование ее ночной ионосферы, основан на сравнении результатов измерений вдоль орбиты спутника «Пионер-Венера» концентрации ионов  $n_i$  и потоков сверхтепловых электронов  $j_e$ . В то время как потоки сверхтепловых электронов были относительно стабильными,  $n_i$  изменялась в существенно больших пределах, и ее изменения не коррелировали с изменениями  $j_e$ . Этот аргумент также представляется уязвимым как с методической, так и с физической точек зрения.

Действительно, в [26] сравниваются вариации двух величин  $n_i$  и  $j_e$  (см. рис. 3–5 в [26]), которые не измерялись непосредственно, а определялись по вольт-амперным кривым, измеренным при помощи одного и того же анализатора с тормозящим потенциалом. При определении  $n_i$  измеренная вольт-амперная характеристика аппроксимировалась заранее заданным аналитическим выражением, зависящим от параметров ионного компонента ионосферной плазмы [29]. В подверженной значительным и нерегулярным вариациям ночной ионосфере Венеры этот метод может привести к неустойчивости оценок ее параметров и, в частности, к тому, что вариации определенных таким способом значений  $n_i$  будут превышать действительные изменения этого параметра. С другой стороны, при определении  $j_e$  по вольт-амперной характеристике использовалось предположение, что  $dj_e/dU_e \geq 0$ , приводящее к сглаживанию изменений электронных потоков [26]. Поэтому по приведенным в [26] данным не представляется возможным судить об относительной изменчивости  $j_e$  и  $n_i$ . Отметим также, что определение величины  $n_i$  на спутнике «Пионер-Венера» проводилось с пространственным разрешением в  $\sim 3$  раза лучшим, чем определение  $j_e$  (см. рис. 3–5 в [26]), что также способствует созданию впечатления о большей изменчивости  $n_i$  вследствие возможности изучения более мелко-масштабных вариаций этого параметра.

С физической же точки зрения даже методически безупречное сравнение относительной величины изменений  $j_e$  и  $n_i$  и отсутствие их корреляции на высотах  $\geq 180$  км в ночной ионосфере Венеры не даст полезной информации относительно источника ионизации, преобладающего в окрестности  $h_{\max}$ . Действительно, проводить сравнения результатов локальных спутниковых измерений  $j_e$  и  $n_i$  имеет смысл только на меньших высотах, где выполняются условия локального (химического) равновесия. На высотах  $\geq 180$  км определяющее влияние на распределение  $n_i$  оказывают уже нелокальные процессы диффузии и/или конвективного переноса плазмы.

В условиях химического равновесия (в случае, когда сверхтепловые электроны обеспечивают существование главного максимума ионизации)  $n_i \sim \sqrt{j_e n_n}$ . Поскольку известно, что в ночной атмосфере  $n_n$  часто подвержена значительным и нерегулярным вариациям [30], то в зависимости от их величины и «фазы» можно наблюдать более значительные изменения  $n_i$  по сравнению с изменениями  $j_e$ , причем изменения обеих величин, вообще говоря, могут и не коррелировать. В таком случае и на больших высотах отсутствие корреляции  $j_e$  и  $n_i$  и различия в величине изменений этих параметров нельзя рассматривать как свидетельство против электронного источника ионизации в главном максимуме ночной ионосферы Венеры.

Вообще, выявление корреляции каких-либо параметров требует по возможности устранения всех не контролируемых в эксперименте факторов. Например, если бы в [26] проводилось сравнение измерений  $j_e$  и концентрации ионов  $n_i$  на переменной высоте  $h_{\max}$ , а не вдоль орбиты спутника, то это позволило бы в значительной степени избавиться от необходимости учета изменений  $n_n$ . Действительно, на переменной высоте  $h_{\max}$  следует ожидать существенно меньших изменений  $n_n$  по сравнению с изменениями  $n_n$  на любой фиксированной высоте, поскольку величина  $n_n(h_{\max})$  определяется только шкалой высот нейтральной атмосферы и сечениями взаимодействия ионизирующих электронов с нейтралами [8, 9]. Такому сравнению  $j_e$  и  $n_i(h_{\max})$  аналогично сравнение значений  $n_{e_{\max}}$  рассчитанных по измеренным на «Венере-9, 10» электронным спектрам, с величинами  $n_{e_{\max}}$ , определенными в результате радиозатменного эксперимента, позволившее выявить корреляцию обеих величин [10, 11]. Однако и этот способ имеет свои недостатки, связанные с тем, что измерения электронных спектров и радиозатменные измерения проводились неодновременно и в разных местах. Это обстоятельство, по-видимому, и явилось причиной не очень высокой (коэффициент корреляции  $\sim 0,6$ ), хотя и положительной корреляции измеренных и расчетных значений  $n_{e_{\max}}$  [10, 11].

**3. О сравнении модельных расчетов с экспериментальными данными.** Сравнение рассчитанных вертикальных профилей концентрации отдельных ионных компонентов  $n_i(h)$  в ночной ионосфере Венеры со сведениями об этих компонентах, полученными в спутниковом эксперименте, в настоящее время является весьма трудной задачей, поскольку в модельных расчетах содержится много не полностью контролируемых в эксперименте параметров как ночной нейтральной атмосферы, так и источника ионизации. Рассчитанные в итоге  $n_i(h)$ -профили также приходится сравнивать не с конкретными результатами измерений  $n_i(h)$  над определенной областью Венеры в определенный момент времени, а со сведениями об  $n_i$ , полученными вдоль траектории спутника, т. е. «размазанными» и во времени и над значительной частью неосвещенной стороны планеты.

Таким образом, не все отличия результатов модельных расчетов от экспериментальных данных позволяют делать выводы о сущности физических процессов, определяющих формирование ночной ионосферы. В отличиях неизбежно заложены и ограниченность модели и неопределенность исходных данных. Поэтому, при сравнении модельных расчетов с экспериментальными данными в настоящее время уверенно можно сравнивать только качественные особенности рассчитанных и «измеренных»  $n_i(h)$ -профилей (в наименьшей степени зависящие от используемой модели и заложенных в нее параметров), и существенными отличиями можно считать только те, которые не могут быть устранены ни при каких допустимых вариациях модели.

Рассмотрим с этой точки зрения результаты сравнения экспериментальных данных с модельными расчетами, выполненными в работе [26] в предположении, что ответственными за поддержание ночной ионосферы являются только потоки сверхтепловых электронов или только диффузия вниз ионов  $O^+$ , перенесенных из дневной ионосферы. В обоих



случаях расчетные профили сравниваются со «сглаженными, средними» профилями  $n_{O^+}(h)$  и  $n_{O_2^+}(h)$ , тогда как в конкретных пролетах вследствие изменчивости ночной ионосферы значения концентрации ионов могут отличаться от «средних» более чем на порядок величины ([18], см. также рис. 3–5 в [26]). С учетом аналогичной изменчивости ночной нейтральной атмосферы [30] и потоков ионизирующих электронов (см. выше рис. 1, 2) не является существенным отличие в  $\sim 2$  раза в окрестности  $h_{\max}$  «средней» концентрации  $O_2^+$  от рассчитанной в предположении, что образование ионов  $O_2^+$  является следствием столкновительной ионизации электронами. Отметим также, что интенсивность электронного источника ионизации в [26] занижена в  $\sim 2$  раза (согласно оценкам этой же работы) вследствие пренебрежения вкладом электронов с энергией  $> 70$  эВ в ионизацию нейтралов.

С другой стороны, формальное совпадение концентрации  $O_2^+$  с величиной, рассчитанной в предположении, что источником ионов  $O_2^+$  являются перенесенные с дневной стороны Венеры ионы  $O^+$ , не является эвристическим. Действительно, в этом случае в модельные расчеты в качестве верхнего граничного условия входит величина диффузионного потока ионов  $O^+$  вниз  $j_{O^+} \approx 10^8$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, непосредственно в эксперименте не измеряемая. Оценки  $j_{O^+}$  основаны на измерениях горизонтальной конвекции ионов  $O^+$ , выполненных в окрестности терминатора планеты на незначительной его части [23]. Предположение, что горизонтальные потоки ионов  $O^+$  однородны по всему терминатору, достаточно неопределенная и переменная толщина слоя, где они текут, предположение, что существенная часть конвектируемых ионов  $O^+$  продиффундирует именно вниз над ночной стороной Венеры, делают оценку  $j_{O^+}$  верной в лучшем случае по порядку величины, если вообще верной. Таким образом, на основании сравнения величины  $n_{O_2^+}$  в окрестности  $h_{\max}$  с результатами расчетов нельзя отдать предпочтение переносу ионов  $O^+$  с дневной стороны Венеры по сравнению со столкновительной ионизацией электронами в качестве основного источника ионизации на этих высотах.

Следует также отметить, что не во всем диапазоне высот результаты модельных расчетов [26], выполненных в обоих предположениях, согласуются с приведенными в этой работе  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилями. На больших высотах ( $\sim 180$  км) концентрация  $O^+$ , рассчитанная в предположении, что единственным источником ионизации являются сверхтепловые электроны, слишком мала по сравнению со «сглаженным, средним»  $n_{O^+}(h)$ -профилем [26]. Однако в случае, когда единственным источником ионизации являются диффундирующие вниз ионы  $O^+$ , на этих же высотах рассчитанная концентрация  $O_2^+$  также по крайней мере на порядок величины отличается от сглаженного  $n_{O_2^+}(h)$ -профиля (см. рис. 11 в [26], хотя в этой работе утверждается, что в этом случае воспроизводятся оба  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профиля). Учитывая неконкретность модели изменчивой ночной атмосферы, использовавшейся при расчетах, и неконкретность  $n_{O_2^+}(h)$ - и  $n_{O^+}(h)$ -профилей изменчивой ионосферы, с которыми сравнивались результаты расчета, трудно сделать определенный вывод о причинах этих отличий. С нашей точки зрения наиболее вероятной причиной расхождений расчетов с экспериментальными сведениями в этом случае является неадекватность математической модели условиям в ночной ионосфере Венеры на больших высотах, связанная, по-видимому, с пренебрежением динамическими процессами и переоценкой роли диффузии на этих высотах.

Проведенное выше рассмотрение показывает нерезультативность в настоящее время количественного подхода к сравнению модельных расчетов ионизации ночной атмосферы Венеры с экспериментальными данными. Поэтому для решения вопроса о преобладающем источнике ионизации в окрестности  $h_{\max}$  представляется необходимым выявить качественные различия распределений  $n_{O^+}(h)$  и  $n_{O_2^+}(h)$  в случаях, когда единственным

источником ионизации являются или потоки сверхтепловых электронов, или диффундирующие вниз ионы  $O^+$ .

При диффузии вниз ионов  $O^+$  через ночную атмосферу Венеры диффузионный поток  $j_{O^+}$  остается практически постоянным (а концентрация  $O^+$  изменяется плавно) вплоть до высот, где вследствие увеличения концентрации углекислого газа ионы  $O^+$  начинают эффективно исчезать в результате следующей ионно-молекулярной реакции  $O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$ . На этом уровне  $j_{O^+}$  и  $n_{O^+}$  резко уменьшаются на расстояниях порядка шкалы высот углекислого газа  $H_{CO_2} \approx 3 \div 4$  км. Упомянутая выше ионно-молекулярная реакция служит в этом случае единственным источником ионов  $O_2^+$  и, следовательно, скорость их производства и концентрация  $O_2^+$  максимальны на спаде  $n_{O^+}(h)$ -профиля. Таким образом, в случае, когда источником ионов  $O_2^+$ , преобладающих в главном максимуме ионизации, являются диффундирующие вниз ионы  $O^+$ , расстояние между максимумами  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей определяется только шкалой высот углекислого газа и по порядку величины равно  $H_{CO_2}$ .

В случае же, когда преобладающим источником ионов  $O_2^+$  в окрестности  $h_{max}$  являются потоки сверхтепловых электронов, высоты максимумов  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей не связаны столь жестко, поскольку определяются, вообще говоря, различными физическими процессами. Максимум концентрации  $O_2^+$  достигается в области высот, где вероятность ионизирующих столкновений для сверхтепловых электронов становится близкой к единице. На этих высотах выполняются условия локального химического равновесия, приводящие к неограниченному росту  $O^+$  с увеличением высоты. Однако с увеличением  $h$  преобладающую роль приобретают диффузионные процессы и максимум  $O^+$  формируется там, где сравниваются характерные времена диффузии и химических процессов. Поэтому в случае электронного источника ионизации расстояние между максимумами  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей может быть существенно больше шкалы высот  $CO_2$ .

В приведенном на рис. 9 в работе [26]  $n_{O^+}(h)$ -профиле, полученном на основании измерений в ночной ионосфере Венеры при помощи анализатора с тормозящим потенциалом, наибольшее значение концентрации  $O^+$  достигается на высоте  $\sim 165$  км. Профиль  $n_{O_2^+}(h)$  в окрестности  $h_{max}$  в этой работе достроен с учетом данных радиозатменного эксперимента, согласно которым высота  $h_{max}$  в ночной ионосфере довольно стабильна и составляет  $\sim 142$  км [19]. Таким образом, согласно этим данным расстояние между максимумами  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей составляет  $\sim 23$  км, т. е. много больше  $H_{CO_2} \approx 3 \div 4$  км и, по-видимому, не может быть объяснено в рамках представлений о диффузии вниз ионов  $O^+$  как основном источнике ионизации в окрестности  $h_{max}$ . Проведенные в [26] модельные расчеты также показывают, что расстояние между максимумами  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей, рассчитанное в рамках этих представлений, не превышает 10 км (см. рис. 12 в [26]), т. е. существенно меньше этого же расстояния по измерениям в ночной ионосфере Венеры.

Ввиду очевидной важности расстояния между максимумами  $n_{O^+}(h)$ - и  $n_{O_2^+}(h)$ -профилей для решения вопроса о преобладающем источнике ионизации в окрестности  $h_{max}$  представляется необходимым оценить это расстояние и пределы его изменения по возможно более полному набору экспериментальных данных со спутника «Пионер-Венера». Надежная информация о высоте  $h_{max}$  в конкретных пролетах может быть получена только радиозатменным методом, поскольку за все время проведения экспериментов на спутнике «Пионер-Венера» высота перигентра над ночной стороной планеты ниже  $\sim 145$  км была только в  $\sim 8$  пролетах [31]. Несколько профилей  $n_{O^+}(h)$  ночной ионосферы Венеры опубликовано в [18, 21] по данным измерений, проведенных на этом спутнике при помощи радиочастотного масс-спектрометра ионов. Названный в [18] «установившимся»  $n_{O^+}(h)$ -профиль, построенный на основании таких измерений

в 59-м пролете, имеет максимум на высоте  $\sim 160$  км. Приблизительно на этой же высоте достигает наибольших значений и концентрация  $O^+$  в 65-м пролете [21]. Эти результаты также указывают на то, что расстояние между  $h_{\max}$  и максимумом  $n_{O^+}(h)$ -профиля существенно превышает  $H_{CO_2}$ . Однако этот вывод, по-видимому, еще рано считать установленным. Если дальнейший тщательный анализ, который, разумеется, могут провести только авторы плазменных экспериментов на спутнике «Пионер-Венера», покажет его достоверность, то вопрос о преобладающем источнике ионизации в главном максимуме ночной ионосферы Венеры можно будет считать решенным в пользу ионизации потоками сверхтепловых электронов.

**4. Обсуждение и выводы.** Как следует из проведенного в этой работе рассмотрения, предпринятая в [26] на основе новых экспериментальных данных попытка выдвинуть более конкретные аргументы в пользу переноса с дневной стороны ионов  $O^+$ , как преобладающего в окрестности  $h_{\max}$  источника ионизации в ночной ионосфере Венеры, привела скорее к противоположному результату. Не возвращаясь к методическим просчетам работы [26], кратко подведем итоги тому, что же определенно известно об обоих источниках ионизации, предлагаемых для объяснения формирования главного максимума  $n_e$ .

Потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт были зарегистрированы над ночной стороной Венеры тремя независимыми приборами: при помощи широкоугольного анализатора с тормозящим потенциалом на спутниках «Венера-9, 10» на высотах  $\geq 1200$  км [6–13], и непосредственно в ионосфере планеты при помощи электростатического анализатора [16] и анализатора с тормозящим потенциалом [26] на спутниках «Пионер-Венера». Во всех трех экспериментах наблюдались сходные величины потоков, зависимость их интенсивности от высоты не обнаружена [26]. Таким образом, можно считать надежно установленным, что потоки сверхтепловых электронов являются источником ионизации в ночной атмосфере Венеры, поскольку присутствие в ней электронов с энергией, существенно превышающей потенциал ионизации нейтралов, не может не привести к их ионизации.

Менее надежно установлено, являются ли ионы  $O^+$ , перенесенные с дневной стороны планеты, источником ионизации в ночной ионосфере. Перенос таких ионов через терминатор, по-видимому, существует [23], однако дальнейшая судьба ионов  $O^+$  и величина их диффузионного потока именно вниз, в плотные слои ночной атмосферы, в значительной степени гипотетична.

Величина потоков ионизирующих электронов вполне достаточна для создания в ночной ионосфере профиля электронной концентрации с величиной  $n_{e_{\max}}$  порядка  $10^4$  см $^{-3}$  [8–13, 16, 26]. По данным измерений электронных потоков на «Венере-9, 10» выявлена их изменчивость (см. рис. 1, 2), вполне соответствующая изменчивости ночной ионосферы Венеры, и корреляция интенсивности этого источника ионизации с результатами радиозатменных измерений  $n_{e_{\max}}$  [10, 11]. Все это свидетельствует, что сверхтепловые электроны могут быть основным источником главного максимума ночной ионосферы Венеры. Аналогичные свидетельства в пользу того, что перенесенные с дневной стороны планеты ионы  $O^+$  могут быть основным источником ионизации в окрестности  $h_{\max}$ , отсутствуют.

Более того, в предыдущем разделе было показано, что если диффузионный поток вниз ионов  $O^+$  определяет формирование главного максимума ионизации ночной ионосферы, состоящего из ионов  $O_2^+$ , то расстояние между максимумами  $n_{O_2^+}(h)$ - и  $n_{O^+}(h)$ -профилей должно быть невелико и равно по порядку величины шкале высот углекислого газа  $H_{CO_2} \approx 3 \div 4$  км. Опубликованные экспериментальные данные свидетельствуют, что в ночной ионосфере расстояние между максимумами  $n_{O_2^+}(h)$ - и  $n_{O^+}(h)$ -профилей, по-видимому, существенно больше и примерно равно 20 км

[18, 21, 26] (этот вывод нуждается в дальнейшем экспериментальном подтверждении). В таком случае формирование главного максимума ионизации не может быть объяснено диффузионными потоками ионов  $O^+$ , и единственным реальным претендентом на роль основного источника ионизации в окрестности верхнего, главного максимума остаются потоки сверхтепловых электронов. Естественным следствием преобладающей роли электронного источника ионизации в окрестности  $h_{\max}$  является вывод о наличии локального химического равновесия на этих высотах (слой  $F_1$ ); переход к диффузионному равновесию будет происходить на высотах максимума  $n_{O^+}(h)$ -профиля (слой  $F_2$ ).

Разумеется, столкновительная ионизация электронами не является единственным источником ионов в ночной ионосфере Венеры. Для объяснения нижнего максимума необходимо привлечение других источников ионизации, некоторые из которых уже упоминались во введении. Более сложно объяснить все особенности распределения концентрации ионов в ночной ионосфере на высотах больших, чем высота максимума  $n_{O^+}(h)$ -профиля. Здесь с увеличением характерных времен установления равновесного состояния ионосферы, по-видимому, более существенную роль приобретают нестационарные процессы и конвективный перенос плазмы. Участие ионов  $O^+$ , перенесенных с дневной стороны планеты, в формировании ночной ионосферы также, вероятно, может быть существенно только на больших высотах, как это и высказывалось ранее в [12, 13, 24].

#### Примечание

После того, как настоящая работа была послана в журнал появилась статья Краснопольского [32] в которой повторялись сделанные ранее в [33] оценки потоков электронов в ночной атмосфере Венеры по интенсивности свечения в линии 5577 А. Поскольку в [32], как и в [33], содержатся утверждения о том, что измерения потоков электронов на «Венере-9, 10» (активно используемые и в настоящей работе) могут быть завышены на порядок величины, представляется необходимым проанализировать по крайней мере основные причины, приведшие к такому выводу.

Сразу же отметим, что в [32, 33] величина измеренных на «Венере-9, 10» электронных потоков критикуется не с точки зрения несостоятельности методики их измерений, а на основании косвенных соображений опирающихся на данные оптического эксперимента не зарегистрировавшего на этих же спутниках свечения в линии 5577 А. Прямые же измерения непосредственно в ночной ионосфере Венеры, проведенные на спутнике «Пионер-Венера» при помощи двух независимых инструментов [16, 26], подтвердили правильность измерений электронных потоков на «Венере-9, 10». Как уже отмечалось в части 4 настоящей работы, во всех трех экспериментах наблюдались сходные значения электронных потоков. Более того, сравнение типичного энергетического спектра по данным анализатора с тормозящим потенциалом на спутнике «Пионер-Венера» (рис. 2 в [26]) с приведенными на рис. 1 в настоящей работе результатами измерений всенаправленного потока электронов  $J_e$  показывает, что в 80÷90% случаев в интервале энергий 15÷50 эВ на «Венере-9, 10» регистрировались потоки электронов даже меньшие (наиболее часто в 2÷4 раза), чем на спутнике «Пионер-Венера». Таким образом, прямые эксперименты не дают оснований для утверждений [32, 33] о каком либо систематическом завышении результатов измерений электронных потоков на спутниках «Венера-9, 10».

Основной причиной таких утверждений явился недостаточно аккуратный подход в [32, 33] к сравнению содержащихся там модельных расчетов с конкретными экспериментальными данными. Так, например, из работы [32] стало ясно, что при сравнении в [33] оцененной там величины предельного направленного вниз потока энергии электронов с результатами измерений потоков электронов за Венерой [9] не было учтено, что в работе [9] измерения электронной компоненты плазмы были представлены в виде всенаправленных потоков. В случае изотропного распределения электронов эта величина в 4 раза превышает поток электронов вниз через площадку  $1 \text{ см}^2$ . Если учесть, что в [33] также был в 2 раза завышен выход состояния  $O(^1S)$  при рекомбинации ионов  $O_2^+$  (см. [32]), то оказывается неубедительным вывод этой работы о расхождении на порядок величины предельного и измеренного потоков энергии электронов.

Как и в работе Спеннера, Кнудсена и др. [26], в работах [32, 33] используются только «типичные, средние» параметры ночной атмосферы и ионосферы Венеры и потоков ионизирующих электронов; реально существующая и измеренная изменчивость всех этих параметров игнорируется. Недостатки такого подхода, применительно к [26], обсуждались в части 3 настоящей работы. Даже учет только того обстоятель-

ства, что электронные потоки за Венерой изменялись в широких пределах (см. рис. 1, 2, а также [10, 11]) полностью устраняет возможность утверждать на основании проведенных в [32] оценок, что потоки электронов, измеренные на «Венере-9, 10» завышены на порядок величины. Другая возможность устранить предполагаемое автором [32] расхождение между результатами плазменного и оптического экспериментов на спутниках «Венера-9, 10» состоит в том, чтобы учесть присутствие магнитного поля в ионосфере Венеры: согласно [32] результаты обоих экспериментов согласуются при наклонении магнитного поля  $D \approx 18^\circ$  (оценка  $D \approx 5^\circ$  была получена в [32] при использовании как достоверных результатов критикуемой в настоящей работе статьи [26]).

Таким образом, расхождение между результатами измерений потоков электронов на спутниках «Венера-9, 10» и модельными оценками [32, 33] не является существенным, поскольку оно легко устраняется вариацией оценок в допускаемых имеющимися экспериментальными данными пределах. Поэтому, выводы этих работ в той их части, где ставится под сомнение результаты измерений электронных потоков на спутниках «Венера-9, 10» неубедительны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mariner Stanford Group, Venus: Ionosphere and atmosphere as measured by dual-frequency radio-occultation of Mariner 5.— *Science*, 1967, v. 158, p. 1678.
2. Грингауз К. И., Безруких В. В., Мусатов Л. С., Бреус Т. К. Плазменные измерения, проведенные вблизи Венеры на космическом аппарате «Венера-4».— *Космич. исслед.*, 1968, т. 6, с. 411.
3. McElroy M. B., Strobel D. F. Models for nighttime Venus ionosphere.— *J. Geophys. Res.*, 1969, v. 74, p. 1118.
4. Butler D. M., Chamberlain J. W. Venus nightside ionosphere: Its origin and maintenance.— *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 81, p. 4757.
5. Bauer S. J., Brace L. H., Hunten D. M. et al. The Venus ionosphere and solar wind interaction.— *Space Sci. Rev.*, 1977, v. 20, p. 413.
6. Грингауз К. И., Безруких В. В., Бреус Т. К. и др. Предварительные результаты измерений плазмы при помощи широкоугольных приборов на спутниках «Венера-9, 10».— *Космич. исслед.*, 1976, т. 14, № 6, с. 839.
7. Gringauz K. I., Bezrukih V. V., Breus T. K. et al. Plasma observations near Venus on board the Venera-9 and -10 Satellites by means of wide-angle plasma detectors.— In: *Physics of solar planetary environments* / Ed. by Williams D. J. AGU, Boulder, Colorado, 1976, p. 918.
8. Gringauz K., Verigin M., Breus T., Gombosi T. Electron fluxes measured on board Venera-9 and -10 in the optical umbra of Venus: main ionization source in Venus' nighttime ionosphere. Preprint Пр-303. Space Research Institute. Moscow: Academy of Science of the USSR, 1976.
9. Грингауз К. И., Веригин М. И., Бреус Т. К., Гомбоши 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.
10. Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T. 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 Research Institute. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1977.
11. Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T. The interaction of the solar wind electrons in the optical umbra of Venus with the planetary atmosphere — the origin of the nighttime ionosphere.— *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, № 5, p. 2423.
12. Gringauz K. T., Verigin M. I., Breus T. K. Low-energetic electrons in the Venus optical umbra detected by the Venera-9 and -10 — the source of night ionosphere: comparison with the Pioneer-Venus satellite measurements. Preprint Пр-534. Space Research Institute. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1979.
13. 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, № 3, с. 430.
14. Маров М. Я., Рабов О. Л. Модель атмосферы Венеры. Препринт № 112, ИПМ АН СССР, 1974.
15. Dickinson R. E., Ridley E. C. Venus mesosphere and thermosphere temperature. II. Day-night variations.— *Icarus*, 1977, v. 30, p. 163.
16. Intrilligator D. S., Collard H. R., Mihalov J. D. et al. Electron observations and ion flows from the Pioneer-Venus orbiter plasma analyzer experiment.— *Science*, 1979, v. 205, p. 146.
17. Nieman H. B., Hartle R. E., Hedin A. E. et al. Venus neutral atmosphere neutral gas composition: First observations of the diurnal variations.— *Science*, 1979, v. 205, p. 54.

18. Taylor H. A., Jr., Brinton H. C., Banar S. J. et al. The ionosphere of Venus: First observations of day-night variations of the ion composition.— Science, 1979, v. 205, p. 96.
19. Kliore A. J., Patel I. R., Nagy A. F. et al. Initial observations of the nightside ionosphere of Venus from Pioneer Venus orbiter radiooccultations.— Science, 1979, v. 205, p. 99.
20. Brace L. H., Theis R. F., Niemann H. B. et al. Empirical models of the electron temperature and density in the nightside Venus ionosphere.— Science, 1979, v. 205, p. 102.
21. Taylor H. A., Jr., 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, № A13, p. 7765.
22. Theis R. F., Brace L. H., Mayr H. G. Empirical models of the electron temperature and density in the Venus ionosphere.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 7787.
23. Knudsen W. C., Spenner K., Miller K. L., Novak V. Transport of ionospheric  $O^+$  ions across the Venus terminator and implications.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 7803.
24. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres of the terrestrial planets.— Rev. Geophys. Space Phys., 1980, v. 18, № 4, p. 813.
25. Александров Ю. Н., Васильев М. Б., Вышлов А. С. и др. Ночная ионосфера Венеры по результатам двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников «Венера-9» и «Венера-10».— Космич. исслед., 1976, т. 14, с. 824.
26. Spenner K., Knudsen W. C., Whitten R. C. et al. On the Maintenance of the Venus nightside ionosphere: Electron precipitation and plasma transport.— J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № 11, p. 9170.
27. Грингауз К. И., Безруких В. В., Волков Г. И. и др. Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля — Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971—1973 гг. 1. Методы и приборы.— Космич. исслед., 1974, т. 12, с. 430.
28. Breus T. K. Solar wind interaction with nonmagnetic and weakly magnetized body of the solar system. Report to the 4-th IAGA Scientific Assembly. Edinburgh, August 3—15, 1981.
29. Miller K. L., Knudsen W. C., Spenner K. S. et al. Solar zenith angle dependence of ionospheric ion and electron temperatures and density on Venus.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 7759.
30. Niemann H. B., Kasprzak W. T., Hedin A. E. et al. Mass spectrometric measurements of the neutral gas composition of the thermosphere and exosphere of Venus.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, 7817.
31. Colin L. The Pioneer Venus program.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, № A13, p. 7575.
32. Краснопольский В. А. О ночном свечении 5577 Å и потоках электронов в ночной атмосфере Венеры.— Космич. исслед., 1982, т. 20, с. 742.
33. Krasnopolsky V. A. Nightside ionosphere of Venus.— Planet. Space Sci., 1979, v. 27, p. 1403.

Поступила в редакцию  
13.VII.1982