

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

КОСМИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XIX

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

---

МОСКВА · 1981

УДК 523.72:523.42

*К. Н. Грингауз, М. Н. Веригин, Т. К. Брюс,  
С. В. Иванова*

### МАЛОЭНЕРГИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ОПТИЧЕСКОЙ ТЕНИ ВЕНЕРЫ, ОБНАРУЖЕННЫЕ НА СПУТНИКАХ «ВЕНЕРА-9, 10» — ИСТОЧНИК НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ СПУТНИКА «ПИОНЕР — ВЕНЕРА»<sup>1</sup>

Показано, что результаты измерений со спутника «Пионер — Венера» подтверждают выводы работ Грингауза и др., опубликованных в 1976—1977 гг., относящихся к малоэнергичным электронам в оптической тени Венеры как источнику ночной ионосферы планеты и к величине концентрации нейтралов в ночной атмосфере на высоте 140 км (отличной от даваемой существовавшими в 1976—1977 гг. моделями). Приведен расчет ионизации в ночной атмосфере Венеры с использованием потоков электронов по данным «Венеры-9, 10» и данных о нейтральной атмосфере, полученных с «Пионер — Венеры».

В 1976 г. при анализе проведенных на спутниках «Венера-9, 10» плазменных измерений авторы работ [3, 4] обратили внимание на то, что на этих спутниках глубоко в оптической тени Венеры всегда и надежно регистрировались весьма изменчивые во времени потоки электронов, а также на то, что обнаруженные потоки электронов могут ионизировать нейтральную атмосферу планеты и обеспечить существование ее ночной ионосферы. Опубликованные позже расчеты ударной ионизации электронами атмосферы Венеры [5, 6], выполненные в предположении изотропного рассеяния электронов при упругих и неупругих столкновениях, показали достаточность измеренных потоков электронов для создания ночной ионосферы планеты.

В 1977 г. на сессии МАГА в Сиэтле были приведены расчеты ударной ионизации электронами атмосферы Венеры, выполненные в другом крайнем предположении — направлении движения электрона, испытавшего столкновение, не изменяется [7]. Эти расчеты, впоследствии опубликованные в работе [8], были проведены с использованием результатов измерений спектров электронных потоков в тех девяти случаях, когда на спутниках «Венера-9, 10» радиозатменным методом измерялся также профиль электронной концентрации  $n_e(h)$  ночной ионосферы Венеры. Было показано наличие корреляции между потоками электронов в оптической тени Венеры и электронной концентрацией в максимуме радиозатменного профиля  $n_{e, \max}$  и на основании этого сделан вывод, что именно обнаруженные на «Венере-9, 10» потоки электронов с энергией в несколько десятков электронвольт ответственны за формирование основного верхнего максимума ионизации [7, 8].

Следует отметить, что во время выполнения упомянутых расчетов прямые измерения состава и концентрации нейтральных частиц  $n_n$  в окрестности максимума ионизации отсутствовали, а в имевшихся моделях

<sup>1</sup> Расширенный вариант доклада на сессии SIV-2 МАГА (Канберра, Австралия, декабрь 1979 г.) [1], опубликованного в виде препринта ИКИ АН СССР [2].

верхней атмосферы  $n_a$  на этих высотах была слишком высокой, для того чтобы ионизирующие электроны могли достичь высоты максимума ионизации, определенного по данным радиозатменных наблюдений. Так, например, в принятой КОСПАР'ом (Варна, Болгария, 1975 г.) модели атмосферы Венеры [9] и в модели [10], рекомендованной ее авторами в качестве стандартной, на высоте 140 км  $n_a \approx 6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> (содержание CO<sub>2</sub> соответственно ~95 и ~60%). На рис. 1 показаны зависимости  $n_a(h)$  согласно модели нейтральной атмосферы [9] и модели [10] (при зенитном угле Солнца  $\chi = 150^\circ$ ).

Так как авторы плазменных измерений на спутниках «Венера-9, 10» были убеждены в том, что корреляция между измеренными на высоте

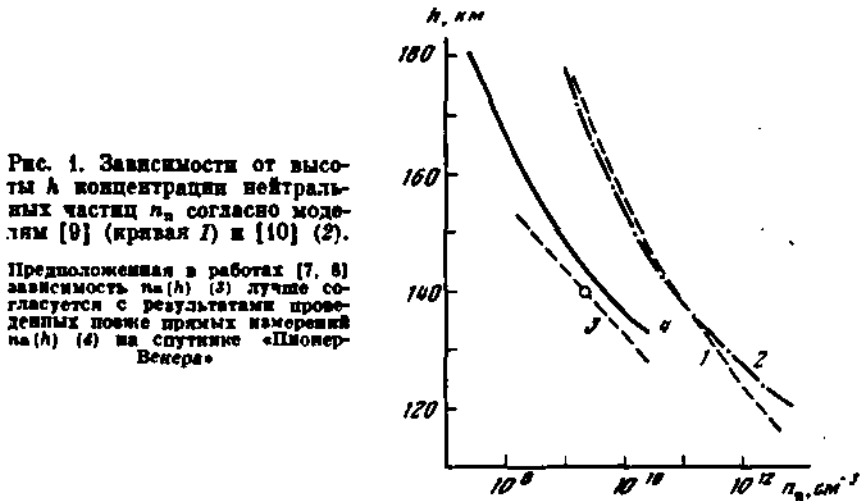


Рис. 1. Зависимости от высоты  $h$  концентрации нейтральных частиц  $n_a$  согласно моделям [9] (кривая 1) и [10] (2).

Предполагаемая в работах [7, 8] зависимость  $n_a(h)$  (3) лучше согласуется с результатами проведенных позже прямых измерений  $n_a(h)$  (4) на спутнике «Пионер-Венера».

~1500 км потоками электронов и  $n_{e, \max}$  свидетельствовала о том, что электроны с энергией в несколько десятков электронвольт достигают высоты ~140 км и являются основным источником ионизации, то ими был сделан вывод, что истинное значение  $n_a$  на этой высоте в ~30 раз меньше, чем величина, принятая в моделях, и составляет  $\sim 2 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup> [7, 8]. Зависимость  $n_a(h)$ , предложенная в работах [7, 8], показана на рис. 1 отрезком линии 3 с кружком (шкала высот  $H_a \approx 5$  км).

В числе результатов измерений, проведенных в окрестности Венеры на спутнике «Пионер-Венера», имеются данные, относящиеся как к нейтральной, так и к ионизированной частям верхней ночной атмосферы Венеры. Наличие таких данных позволяет проверить правильность выводов, сделанных в предшествующих публикациях авторов [5-8].

По данным измерений, выполненных при помощи установленного на спутнике «Пионер-Венера» квадрупольного масс-спектрометра, оказалось, что на высоте ~140 км ( $\chi = 150^\circ$ )  $n_a \approx 5 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, основными составляющими являются CO<sub>2</sub> (~80%) и O (~30%) [11]. На рис. 1 кривая 4 показывает зависимость  $n_a(h)$  по этим данным. Как видно из этого рисунка, результаты прямых измерений  $n_a$  значительно лучше согласуются с зависимостью  $n_a(h)$ , предложенной в работах [7, 8], чем с данными существовавших моделей нейтральной атмосферы. Таким образом, подтвердилась правильность поправок в отношении  $n_a$ , внесенных этими работами в модели нейтральной атмосферы Венеры. Присутствие значительного количества атомарного кислорода на ионосферных высотах, приводящее к тому, что основным ионом в максимуме  $n_a(h)$  является O<sub>2</sub><sup>+</sup>, не должно повлечь изменения выводов этих работ, так как коэффициенты диссоциативной рекомбинации ионов O<sub>2</sub><sup>+</sup> и CO<sub>2</sub><sup>+</sup> близки [8]. Однако с появлением прямых измерений концентрации и состава ночной верхней атмосферы Венеры представляет интерес повторить проведенные ранее расчеты взап-

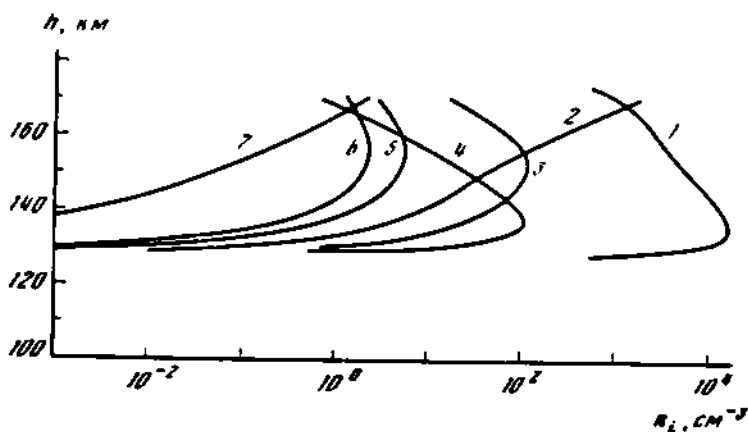


Рис. 2. Результаты расчета высотных профилей ионосферных ионов ( $\chi=150^\circ$ ), выполненного с использованием измерений спектра ионизирующих электронов 28.X 1975 г. на спутнике «Венера-9».

1 —  $[O^+]$ , 2 —  $[O^+]$ , 3 —  $[NO^+]$ , 4 —  $[CO_2^+]$ , 5 —  $[N_2^+]$ , 6 —  $[CO^+]$ , 7 —  $[He^+]$

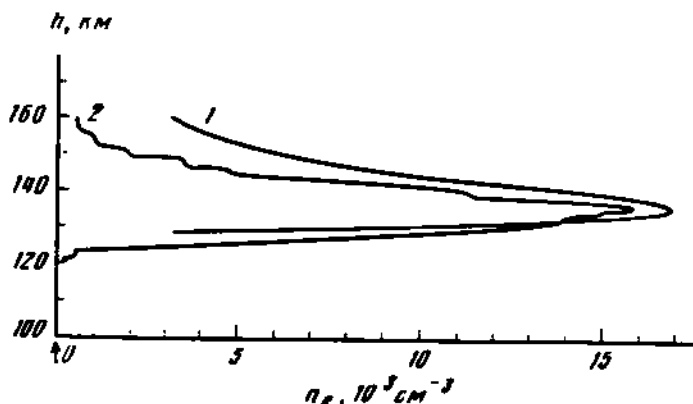


Рис. 3. Сопоставление профиля  $n_e(h)$ , рассчитанного по измеренным на спутнике «Венера-10» потокам ионизирующих электронов (1), с радиозатменным профилем (2)

модеиствия электронных потоков с уже полученными в эксперименте [11] параметрами реальной атмосферы Венеры.

Для того чтобы учесть влияние других, кроме  $CO_2$ , составляющих нейтральной атмосферы на изменение с высотой функции распределения  $f$  ионизирующих электронов, мы добавили в правую часть уравнения (2) из работ [7, 8] слагаемые, аналогичные имеющимся и пропорциональные концентрациям  $[O]$ ,  $[CO]$ ,  $[N_2]$  и  $[He]$ . Скорости ионообразования  $q_{CO_2^+}$ ,  $q_{O^+}$ ,  $q_{CO^+}$ ,  $q_{N_2^+}$  и  $q_{He^+}$  считались после определения  $f$  по формулам, аналогичным формуле (5) из [7, 8], и не учитывалась возможность образования других, кроме  $CO_2^+$ ,  $CO^+$ ,  $N_2^+$ , ионов при ударной ионизации молекул  $CO_2$ ,  $CO$  и  $N_2$ . Входящие в эти уравнения сечения ионизации и возбуждения нейтральных составляющих рассчитывались по данным статьи [12]. Концентрация ионосферных ионов определялась с учетом приведенных в таблице скоростей образования и потерь ионов, которая основывается на данных работы [13].

Результаты расчета высотного профиля каждого из перечисленных в таблице ионов приведены на рис. 2, а результаты расчета  $n_e(h)$ -профиля (сумма концентраций ионов) показаны плавной кривой (кривая 1) на рис. 3. Вычисления были выполнены с использованием результатов измерения спектра ионизирующих электронов на спутнике «Венера-9».

28.X.1975 г. ( $h \approx 1700$  км,  $\chi \approx 142^\circ$ ). Кривая 2 на рис. 3 представляет результаты определения  $n_e(h)$  по данным бывшего на  $\sim 11$  мин позже радиозатмения спутника ( $\chi \approx 150^\circ$ ) [14]. Как видно из этого рисунка, профиль  $n_e(h)$ , рассчитанный по измеренным потокам электронов с учетом параметров реальной ночной атмосферы Венеры (а не их модельных значений), согласуется с радиозатменным профилем по высоте максимума  $h_{\max}$ , значениям  $n_{e, \max}$  и ширине на уровне  $n_{e, \max}/2$ . Таким образом, результаты прямых измерений  $n_e$  в атмосфере Венеры поддерживают представление об электронном источнике ионизации в ночной ионосфере Венеры.

Начиная с 1978 г. потоки электронов в качестве источника ионизации ночной атмосферы Венеры обсуждались в ряде работ [15–20] и признаны возможным источником. Как конкурирующий механизм ионизации

Скорости образования и потерь ионов, использованные при расчетах в окрестности максимума  $n_e$

Ион	Скорость образования, см <sup>-3</sup> ·с <sup>-1</sup>	Скорость потерь, см <sup>-3</sup> ·с <sup>-1</sup>
O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$9,4 \cdot 10^{-10} [O^+][CO_2]$ $1,56 \cdot 10^{-10} [CO_2^+][O]$	$2,2 \cdot 10^{-7} [O_2^+][e]$
O <sup>+</sup>	$1,4 \cdot 10^{-10} [CO^+][O]$ $9,6 \cdot 10^{-11} [CO_2^+][O]$	$9,4 \cdot 10^{-10} [O^+][CO_2]$
NO <sup>+</sup>	$1,34 \cdot 10^{-10} [N_2^+][O]$	$4,5 \cdot 10^{-7} [NO^+][e]$
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$10^{-9} [CO^+][CO]$ $7,7 \cdot 10^{-10} [N_2^+][CO_2]$	$2,6 \cdot 10^{-10} [CO_2^+][O]$
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$q_{N_2^+}$	$7,7 \cdot 10^{-10} [N_2^+][CO_2]$ $1,34 \cdot 10^{-10} [N_2^+][O]$
CO <sup>+</sup>	$q_{CO^+}$	$10^{-9} [CO^+][CO_2]$ $1,4 \cdot 10^{-10} [CO^+][O]$
He <sup>+</sup>	$q_{He^+}$	$1,1 \cdot 10^{-9} [He^+][CO_2]$ $1,6 \cdot 10^{-9} [He^+][N_2]$ $1,7 \cdot 10^{-9} [He^+][CO]$

рассматривался перенос ионов O<sup>+</sup> из дневной ионосферы, их последующая диффузия вниз и ионно-молекулярная реакция с CO<sub>2</sub> [17, 18, 20, 21]. Однако этот источник приводит к образованию в 2–3 раза более широкого профиля  $n_e(h)$  на уровне  $n_{e, \max}/2$  по сравнению с профилем, образовавшимся в результате ионизации электронами (см. рис. 4 в работе [18]). Более широкий диффузионный профиль  $n_e(h)$  имеет максимум на высоте  $h_{\max}$ , определяющийся из условия равенства характерного времени диффузии  $\tau_D = H_p^2/D$  ионов O<sup>+</sup> и характерного времени реакции  $O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$   $\tau_{ch} = (k[CO_2])^{-1}$ ,  $k = 9,4 \cdot 10^{-10}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>. При коэффициенте диффузии  $D \approx 10^{10}/n_e$  см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> [22] это условие приводит к  $h_{\max} \approx 155$  км ( $n_e(h_{\max}) \approx 3 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>). Таким образом, вклад ионов O<sup>+</sup>, перенесенных из дневной ионосферы, по-видимому, может быть существенен только в формировании части  $n_e(h)$ -профиля над максимумом ионизации ночной ионосферы Венеры.

Основанием для критического отношения к электронам, как к источнику ионизации ночной атмосферы Венеры, служило также отсутствие наблюдений свечения ночной атмосферы [20, 23]. Однако, как было показано в работах [16, 24], оценки свечения с  $\lambda = 5577$  Å в [23] недостаточно надежны. И хотя авторы работы [25], вначале приписывавшие все свечение  $\sim 6$  кР в окрестности  $\lambda = 2068$  Å полосе (0, 0) СО Камерона (откуда следовали оценки потока энергии, выпадающей в ночную атмосфе-

ру  $\sim 0,1 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ), впоследствии изменили точку зрения [26], по оставленный ими в этой работе верхний предел интенсивности излучения СО в полосе Камерона все еще достаточно велик ( $\leq 4 \text{ кR}$ ) и, по-видимому, не противоречит предположению об электронном источнике ионизации. (Для более надежного заключения следует подождать опубликования результатов УФ-спектроскопии со спутника «Пионер-Венера» в диапазоне 2800+3400 А.)

Решающим аргументом в пользу того, что ионосфера в окрестности верхнего максимума  $h_p$ , создается в результате ударной ионизации атмосферы электронами, являются, с нашей точки зрения, измерения потоков ионизирующих электронов, выполненные непосредственно в ночной ионосфере Венеры [19] и показавшие, что эти электроны действительно достигают ионосферных высот. Согласно данным этой работы, в ночной ионосфере величина потока электронов с энергиями 50+250 эВ составляет  $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , что вполне достаточно для ее создания. Если эти измерения надежны, то выдвинутое в работах [3-8] представление о малоэнергичных электронах как источнике ионизации в ночной ионосфере следует считать доказанным.

Остановимся в заключение на происхождении электронов, создающих ночную ионосферу. Энергия, приносимая ими в ночную атмосферу, несомненно происходит от солнечного ветра, однако путь передачи этой энергии может быть достаточно длинным и не вполне ясен. Как известно, за Венерой существует плазменно-магнитный хвост, обнаруженный по данным измерений [27] электронной компоненты плазмы [28] и магнитного поля [29] и обладающий многими атрибутами магнитного хвоста Земли. Магнитное поле в плазменно-магнитном хвосте Венеры характеризуется наличием двух связей магнитных силовых линий, разделенных слоем, где плотность энергии магнитного поля минимальна. В окрестности этого слоя обнаруживаются потоки энергичных ионов — плазменный слой, в котором регистрировались ионы с энергией 2+4 кэВ [27, 28]. Физические процессы, приводящие к разогреву ионов в плазменном слое плазменно-магнитного хвоста Венеры, воздействуют и на электроны, увеличивая их энергию. Поэтому электроны, высвобождающиеся в ночную атмосферу Венеры из ее плазменно-магнитного хвоста, по-видимому, не являются непосредственно электронами солнечного ветра.

Энергичные ионы плазменного слоя, вторгаясь в атмосферу Венеры, также будут производить ее ионизацию. Этот источник ионизации [27] обладает необходимым свойством изменчивости, эффективен на более низких высотах, по сравнению с ионизацией электронами, и может быть предложен в качестве источника, ответственного за формирование спорадического нижнего максимума  $h_p$ . Измерения направленных к Венере потоков ионов плазменного слоя на спутниках «Венера-9, 10» не проводились. Потоки же ионов в направлении от Венеры составляют 0,5+5% потока ионов в солнечном ветре (см., например, рис. 8, 9, в работе [28]) и если потоки ионов в плазменном слое в основном изотропны, то (согласно оценкам ионизации, производимой протонами в атмосфере Венеры [22, 30]) следует ожидать, что создаваемая этими потоками ионизация окажется сравнимой с ионизацией, наблюдаемой в нижнем максимуме ночной ионосферы Венеры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K. Low energy electrons revealed by Venera-9, 10 satellites in the shadow — the source of the planetary nocturnal ionosphere: comparison with Pioneer — Venus results. — In: Program and abstracts XVII IUGG General Assembly Canberra, 1979 / Ed. by Fukushima N. IUGG Publication office. Paris, France, p. 325.
2. Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K. Low — energetic electrons in the Venus optical umbra detected by the Venera-9 and -10 — the source of the night ionosphere. Comparison with the Pioneer — Venus satellite measurements. — Preprint ИР-534, Space Research Institute. Acad. Sci. USSR, Moscow, 1979.

3. *Gringauz K. I., Bezrukikh V. V. и др.* Предварительные результаты измерений плазмы при помощи широкоугольных приборов на спутниках «Венера-9, 10». — *Космич. исслед.*, 1976, т. 14, № 6, с. 839.
4. *Gringauz K. I., Bezrukikh V. V. 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.
5. *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. Acad. Sci. USSR, Moscow, 1976.
6. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T.* Электронные потоки, измеренные в оптической тени Венеры на спутниках «Венера-9, 10» — основной источник ионизации в ночной ионосфере Венеры. — *ДАН СССР*, 1977, т. 232, № 5, с. 1039.
7. *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. Acad. Sci. USSR, Moscow, 1977.
8. *Gringauz K. I., Verigin M. I., Breus T. K., Gombosi T.* The interaction of electrons in the optical umbra of Venus with the planetary atmosphere — the origin of the nighttime ionosphere. — *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, p. 2123.
9. *Маров М. Я., Рабое О. Л.* Модель атмосферы Венеры. — Препринт № 112, НИИ АН СССР, М., 1974.
10. *Lickinson R. E., Ridley E. C.* Venus mesosphere and thermosphere temperature. II. Day-night variations. — *Icarus*, 1977, v. 30, p. 163.
11. *Nieman H. B., Hartle R. E. et al.* Venus upper atmosphere neutral gas composition: First observations of the neutral variations. — *Science*, 1979, v. 205, p. 54.
12. *Jackman C. H., Garvey R. H., Green A. E. S.* Elektron impact on atmospheric fases. I. Updated cross sections. — *J. Geophys. Res.*, 1977, v. 82, p. 5081.
13. *Albritton D. L.* 10n-neutral reactions rate constants measured in flow reactors through 1977. — *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1978, v. 22, p. 1.
14. *Александров Ю. Н., Васильев М. Б. и др.* Ночная ионосфера Венеры по результатам двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников «Венера-9, 10». — *Космич. исслед.*, 1976, т. 14, № 6, с. 824.
15. *Chen R. H., Nagy A. F.* A comprehensive model of the Venus ionosphere. — *J. Geophys. Res.*, 1978, v. 83, p. 1133.
16. *Gravens T. E., Nagy A. F., Chen R. H., Stewart A. I.* The ionosphere and airflow of Venus: prospects for Pioneer-Venus. — *Geophys. Res. Lett.*, 1978, v. 5, p. 613.
17. *Kilore A. J., Patel I. R. et al.* The nightside ionosphere of Venus from Pioneer-Venus radio occultation. — *Science*, 1979, v. 205, p. 99.
18. *Brace L. H., Theis R. F. et al.* Empirical models of the electron temperature and density in the nightside Venus ionosphere. — *Science*, 1979, v. 205, p. 102.
19. *Intrilligator D. S., Collard H. R. et al.* Initial observations of the Pioneer-Venus orbiter plasma analyzer experiment. II. — *Science*, 1979, v. 205, p. 116.
20. *Jonson F. S., Hanson W. B.* A new concept for the day time magnetosphere of Venus. — *Geophys. Res. Lett.*, 1979, v. 6, p. 581.
21. *Taylor H. A., Brinton H. C. et al.* The ionosphere of Venus: first observations of day — night variations of the ion composition. — *Science*, 1979, v. 205, p. 96.
22. *Бауэр З.* Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976.
23. *Krasnopolsky V. A.* Nightside ionosphere of Venus. — *Planet. Space Sci.*, 1979, v. 27, p. 1403.
24. *Breus T. K.* Venus: review of present understanding of solar wind interaction. — Preprint D-258. Space Research Institute. Acad. Sci. USSR, Moscow, 1978.
25. *Stewart A. I., Anderson D. E., Jr., Esposito L. W., Barth C. A.* Ultraviolet spectroscopy of Venus: initial results from Pioneer-Venus orbiter. — *Science*, 1979, v. 203, p. 777.
26. *Stewart A. I., Barth C. A.* The ultraviolet night airglow of Venus. — *Science*, 1979, v. 205, p. 59.
27. *Веригин М. И.* Исследование взаимодействия потоков солнечной плазмы с Венерой при помощи спутников «Венера-9, 10» (по данным широкоугольных плазменных анализаторов). Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: НИИ АН СССР, 1978, 227 с.
28. *Verigin M. I., Gringauz K. I. et al.* Plasma near Venus from the Venera-9 and -10 wide angle analyzer data. — Preprint D-251. Space Research Institute. Acad. Sci. USSR, Moscow, 1977; *J. Geophys. Res.*, 1978, v. 83, p. 3721.
29. *Долгунов Ш. Ш., Жуков Л. Н., Шарова В. А., Ерошенко Е. Г.* Магнитосфера планеты Венера. — Препринт № 19/1931. М.: ИЗМИРАН СССР, 1977.
30. *McElroy M. B., Strobel D. F.* Models for nighttime Venus ionosphere. — *J. Geophys. Res.*, 1969, v. 74, p. 1118.

Поступила в редакцию  
20.VIII.1980