

К. И. ГРИНГАУЗ, М. И. ВЕРИГИН, Т. К. БРЕУС, Т. ГОМБОШИ (ВНР)

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ, ИЗМЕРЕННЫЕ В ОПТИЧЕСКОЙ ТЕНИ  
ВЕНЕРЫ НА СПУТНИКАХ «ВЕНЕРА-9» И «ВЕНЕРА-10» —  
ОСНОВНОЙ ИСТОЧНИК ИОНИЗАЦИИ В НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЕ  
ВЕНЕРЫ**

(Представлено академиком Р. З. Сагдеевым 10 VIII 1976)

Имеющиеся в настоящее время сведения о ночной ионосфере Венеры были получены при однократных наблюдениях радиозатмений космических аппаратов Маринер 5<sup>(1)</sup>, Маринер 10<sup>(2)</sup> и при многократных аналогичных наблюдениях при помощи спутников «Венера-9, 10»<sup>(3)</sup>.

На изменчивых высотных профилях электронной концентрации  $n_e(h)$  присутствовали один или два максимума  $n_e$  со значениями  $n_{em}$  от  $\sim 6 \cdot 10^3$  до  $\sim 2 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> на высотах  $h_m$  от  $\sim 120$  до  $\sim 140$  км. Объяснение сравнительно высоких концентраций электронов в ночном максимуме и изменчивости  $n_e(h)$ -профилей представляло серьезную трудность<sup>(4, 5)</sup>. Действительно, период вращения верхней атмосферы Венеры составляет  $\sim 4$  суток<sup>(6)</sup>, а характерное время рекомбинации  $\tau_R \approx (\alpha n_{em})^{-1} \approx 100-500$  сек. при  $\alpha \approx 3,8 \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>·сек<sup>-1</sup>,  $\alpha$  — коэффициент диссоциативной рекомбинации CO<sub>2</sub><sup>+</sup> с электронами, которая преобладает над другими видами рекомбинации<sup>(7)</sup>; следовательно, для поддержания ночной ионосферы Венеры необходимо существование довольно интенсивного постоянно действующего источника ионизации. В качестве возможных источников ночной ионизации обсуждались турбулизованные за фронтом околоранетной ударной волны потоки солнечного ветра, частично попадающие в атмосферу Венеры, космические лучи, рассеянное  $L_\alpha$ -излучение, перезарядка CO<sub>2</sub> с ионами He<sup>+</sup>, перенесенными с дневной стороны планеты, метеоритная ионизация<sup>(1, 4, 5, 8)</sup>. Все рассмотренные гипотезы или не давали удовлетворительного объяснения наблюдаемых значений  $n_e$  или не опирались на прямые экспериментальные данные, относящиеся к источникам ионизации.

На спутниках «Венера-9» и «Венера-10» проводили измерения направленных к Венере потоков электронов на высотах  $\sim 1500-2000$  км в оптической тени планеты. Используемые приборы незначительно отличаются от применявшихся ранее в плазменных экспериментах вблизи Марса<sup>(9)</sup>. Ниже приводятся оценки, показывающие, что измеренные потоки электронов достаточны для ионизации нейтральной атмосферы Венеры с величиной  $n_{em}$ , соответствующей данным наблюдений.

Энергетические спектры электронов регистрировали при помощи широкоугольного ( $\pm 40^\circ$ ) датчика с анализом электронов по энергиям при подаче на анализирующую сетку 16 значений тормозящего потенциала  $U_T$  в диапазоне 0–300 в.

В оптической тени планеты потоки электронов регистрировали всегда и при всех значениях тормозящего потенциала  $U_T$ . В качестве примера в табл. 1 приведены значения всенаправленного потока электронов  $j_{e0}$  с энергией  $E \geq eU_T$ , рассчитанного по измеренным токам электронного датчика с учетом угловых характеристик ловушки (см. <sup>(9)</sup>) в предположении, что функция распределения электронов изотропна. Участки орбит спутников, на которых получены эти данные, выделены жирной чертой на рис. 1.

Как видно из табл. 1, в оптической тени Венеры (см. рис. 2) в этих сеансах измерений  $j_{e0}$  ( $E \geq 40$  эв)  $\approx (1-2) \cdot 10^3$  см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>, большинство электронов имеет энергию порядка десятков электронов-вольт.

$U_T, \text{ в}$	0	10	20	40	80	150	300	Примечание
$i_{e0}(E \geq eU_T),$ $10^8 \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$	7	4	2,5	1,2	0,6	0,6	0,5	«Венера-9», 11XI 1975 г., 06 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> UT
	3,1	2,3	2	2	1,4	0,8	0,5	«Венера-10», 20XI, 1975 г., 21 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> UT

Процессы взаимодействия электронных потоков с нейтральной атмосферой (Земли) ранее неоднократно рассматривались (см., например, обзор <sup>(10)</sup>), однако такое рассмотрение проводилось для электронов с энергией порядка килоэлектрон-вольт (или нескольких десятков килоэлектрон-вольт), когда можно пренебречь их рассеянием и когда энергия, в среднем затраченная на один акт ионизации  $E_i$  ( $\sim 35$  эв в земной атмосфере <sup>(10)</sup>) мала по сравнению с энергией ионизирующих электронов. Вблизи Венеры оба эти условия не выполняются и требуется специальное рассмотрение.

Используем кинетическое уравнение <sup>(11)</sup>

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{v}} - \frac{e}{m_e} \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}] \right) \frac{\partial F}{\partial \mathbf{v}} = \left( \frac{\partial F}{\partial t} \right)_c, \quad (1)$$

где  $F(\mathbf{v}, \mathbf{r})$  — функция распределения электронов,  $(\partial F / \partial t)_c$  — интеграл столкновений. Рассматривая стационарный случай и пренебрегая влиянием электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{B}$  полей, сохраним в правой части (1) только второе слагаемое. На высотах максимума ионизации основной составляющей нейтральной атмосферы является  $\text{CO}_2$ . Сечение упругого рассеяния электронов  $\sigma_e$  в  $\text{CO}_2$  в диапазоне энергий 20–50 эв составляет  $\sim (1,2-1,6) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  <sup>(12)</sup>. В качестве основного неупругого процесса будем рассматривать ионизацию  $\text{CO}_2$  при столкновениях с электронами. Сечение ионизации  $\sigma_i$  быстро растет с энергией электронов от  $\sim 6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$  при  $E \approx 20$  эв до  $\sim 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при  $E \approx 40$  эв, достигает  $\sim 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при  $E \approx 100$  эв, после чего уменьшается до  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$  при  $E \approx 1000$  эв <sup>(13)</sup>. В дальнейшем будем считать сечения столкновений не зависящими от энергии и с учетом <sup>(12, 13)</sup>, выберем их равными  $\sigma_e \approx 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_i \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при  $E \geq 40$  эв,  $\sigma_i \approx 0$  при  $E \leq 40$  эв. Таким образом, при столкновениях электронов с энергией в несколько десятков электрон-вольт с молекулами  $\text{CO}_2$  в основном происходит упругое рассеяние электронов ( $\sigma_e / \sigma_i \sim 5$ ), приводящее к изотропизации их функции распределения  $F(\mathbf{v}, \mathbf{r})$ . Поэтому, если разложить  $F(\mathbf{v}, \mathbf{r})$  по сферическим функциям  $Y_{lm}(\mathbf{v}/v)$ ,

$$F(\mathbf{v}) = F_0(v) + \frac{\mathbf{v}}{v} \mathbf{F}_1(v) + \sum_{l \geq 2, m} F_{lm}(v) Y_{lm} \left( \frac{\mathbf{v}}{v} \right), \quad (2)$$

где  $F_0(v)$ ,  $\mathbf{F}_1(v)$ ,  $F_{lm}(v)$  — функции абсолютного значения скорости, то следует ожидать, что слагаемое  $F_0(v)$  будет наибольшим.

Сохранив в (2) только два первых слагаемых и подставив (2) в (1), можно написать уравнения для определения  $F_0$  и  $\mathbf{F}_1$  (см., например, <sup>(11)</sup>):

$$\frac{1}{3} v \nabla F_1 - J_0 = 0, \quad v \nabla F_0 - J_1 = 0, \quad (3)$$

$$J_0 = \int \left( \frac{\partial F}{\partial t} \right)_c \frac{d\Omega}{4\pi}, \quad J_1 = 3 \int \frac{\mathbf{v}}{v} \left( \frac{\partial F}{\partial t} \right)_c \frac{d\Omega}{4\pi}$$

соответственно, нулевой и первый моменты интеграла столкновений.

В результате столкновений число электронов со скоростями в интервале  $(\mathbf{v}, \mathbf{v} + d\mathbf{v})$  за время  $dt$  изменится на

$$\begin{aligned} (\partial F / \partial t)_c v^2 dv d\Omega dt = & n_n v (-\sigma_e F(\mathbf{v}) + \sigma_e F_0(v) - \sigma_i F(\mathbf{v}) + \\ & + \sigma_i F_0(\sqrt{v^2 + 2E_i/m_e})(1 + 2E_i/m_e v^2)) v^2 dv d\Omega dt, \end{aligned} \quad (4)$$

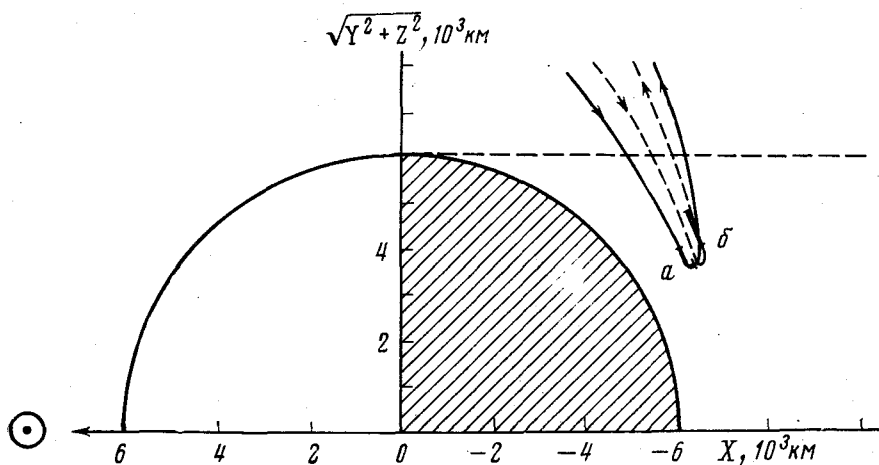


Рис. 1. Околопланетные части орбит «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б)

где  $n_n$  — концентрация нейтралов. Первое и третье слагаемые в (4) описывают уменьшение электронов в рассматриваемом интервале скоростей в результате соответственно упругих и неупругих столкновений; второе — приток в интервал  $(v, v+dv)$  электронов, испытавших упругое рассеяние, а последнее — приток электронов, потерявших при ионизации энергию  $E_i$ .

При выводе (4) предполагалось, что при упругих столкновениях энергия электрона не изменяется, при неупругих уменьшается на величину  $E_i$  и что все направления скорости электрона после столкновения равновероятны. При дальнейших оценках будем считать, что энергетический спектр электронов достаточно быстро спадает с увеличением энергии, так что

$$F_0(v) \gg F_0(\sqrt{v^2 + 2E_i/m_e}) \quad (5)$$

и поэтому последним слагаемым в (4) можно пренебречь. Это означает, что при рассмотрении ионообразования можно пренебречь ионизацией, производимой электронами, испытавшими уже одно неупругое столкновение; влияние этого предположения на наши оценки обсуждается в дальнейшем.

Используя (4), с учетом (5), из уравнений (3) исключим  $F_1(v)$ :

$$\Delta F_0 - 1/n_n (\nabla n_n \cdot \nabla F_0) - 3n_n^2 \sigma_i (\sigma_i + \sigma_c) F_0 = 0. \quad (6)$$

Для плоской атмосферы, в которой  $n_n$  и  $F_0$  зависят только от высоты  $h$ , используя монотонно спадающее с уменьшением  $h$  решение уравнения (6), можно найти скорость ионообразования  $q$  на высоте  $h$ :

$$q = j_{e0} (E \geq 40 \text{ эв}) \cdot \sigma_i n_n(h) \cdot \exp \left( -\sqrt{3\sigma_i(\sigma_i + \sigma_c)} \int_h^\infty n_n(h) dh \right). \quad (7)$$

Концентрацию ионосферных электронов  $n_e(h)$  оценим из условия локального равновесия ионообразования и рекомбинации:  $q - \alpha n_e^2 = 0$ , откуда  $n_e(h) = [q(h)/\alpha]^{1/2}$ . Высоту максимума ионизации  $h_m$  найдем из условия  $dn_e(h_m)/dh = 0$ , откуда, используя (7), получим,

$$dn_n(h_m)/dh = -\sqrt{3\sigma_i(\sigma_i + \sigma_c)} n_n^2(h_m). \quad (8)$$

Так как  $n_n(h) = n_n(h_m) \exp(-(h-h_m)/H(h_m))$  в окрестности  $h_m$ , где  $n_n(h_m)$  и  $H(h_m)$  — концентрация и шкала высот для нейтралов при  $h=h_m$ , то из (8) следует, что

$$\sqrt{3\sigma_i(\sigma_i + \sigma_c)} n_n(h_m) H(h_m) = 1. \quad (9)$$

В «максимальной» модели нейтральной атмосферы Венеры, наиболее соответствующей условиям наших измерений (1975 г., ~ минимум сол-

ночной активности и ночь), температура верхней атмосферы  $T_{\infty}$  принята равной  $430^{\circ}\text{K}$  (<sup>14</sup>). Согласно этой модели, уравнению (9) удовлетворяет  $h_m \approx 180$  км, на которой  $n_n(h_m) \approx 9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ,  $H(h_m) \approx 11$  км. Расхождения оцененной этим способом высоты  $h_m$  с высотами максимума ночной ионосферной ионизации, наблюдавшегося методом радиозатмений (<sup>1-3</sup>), возможно, связаны с недостаточным знанием параметров ночной нейтральной верхней атмосферы Венеры. Действительно, например, в работе (<sup>15</sup>), рассматривающей изменение температуры верхней атмосферы от дня к ночи, при среднем уровне солнечной активности величина  $T_{\infty}$  изменяется от  $\sim 800^{\circ}\text{K}$  днем до  $\sim 300^{\circ}\text{K}$  ночью. Измерения на «Венере-9» и «Венере-10» соответствуют минимуму солнечной активности, поэтому, принимая для ночи  $T_{\infty} \approx 250^{\circ}\text{K}$  и продолжая «максимальную» модель (<sup>14</sup>) с высоты 100 км (на которой параметры, приведенные в этой модели достаточно надежны (<sup>14</sup>)) по барометрической формуле, получим, что в этом случае уравнению (9) удовлетворяет высота максимума ионосферной ионизации  $h_m \approx 150$  км, значительно лучше согласующаяся с результатами наблюдений (<sup>1-3</sup>). На этой высоте  $n_n(h_m) \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ,  $H(h_m) \approx 6$  км.

Если предположить, что  $n_n(h)$  на всех высотах описывается приведенным выше выражением, верным в окрестности  $h_m$ , то выражение для профиля электронной концентрации можно записать в виде

$$n_e(h) = \sqrt{\frac{n_n(h_m) \sigma_{je0}}{\alpha}} \exp(-1/2(h-h_m)/H(h_m) - 1/2 \exp(-(h-h_m)/H(h_m))). \quad (10)$$

Из (10) можно получить концентрацию ионосферных электронов в максимуме ночной ионосферы  $n_{em} = [n_n(h_m) \sigma_{je0} / \alpha e]^{1/2} \approx (5-8) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Следовательно, измеренные в эксперименте на спутниках «Венера-9, 10» потоки электронов в оптической тени планеты вполне могут обеспечить существование наблюдаемых значений  $n_e$  в ночной ионосфере Венеры.

Выше не учтены некоторые факторы, влияющие на  $n_{em}$  и  $h_m$ , в частности, ионизирующее действие ионных потоков, попадающих в ночную ионосферу из оптической тени планеты, и реальная функция распределения ионизирующих электронов. Последняя может падать с увеличением энергии медленнее, чем описывается условием (5). Это, однако, приведет к тому, что энергичные электроны, осуществив акты ионизации  $\text{CO}_2$  на высоте  $h$  будут диффундировать на меньшие высоты, проводя повторную ионизацию, что, очевидно, вызовет увеличение  $n_{em}$  и понижение  $h_m$ . Таким образом, указанные неточности не могут изменить основного вывода о достаточности потоков электронов в оптической тени планеты для создания ее ночной ионосферы.

Авторы благодарят А. А. Галева, М. Я. Марова, В. И. Мороза и Н. К. Осипова за полезную дискуссию.

Институт космических исследований  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
22 VII 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Mariner Stanford Group, Science, v. 158, 1678 (1967). <sup>2</sup> H. T. Howard et al., Science, v. 183, 1297 (1974). <sup>3</sup> Ю. Н. Александров, М. Б. Васильев и др., Препринт инст. космич. иссл. АН СССР, М., Пр-278, 1976. <sup>4</sup> К. И. Грингауз и др., Косм. иссл., т. 6, 411 (1968). <sup>5</sup> M. B. McElroy, D. F. Strobel, J. Geophys. Res., v. 74, 1118 (1969). <sup>6</sup> А. Д. Кузьмин, М. Я. Маров, Физика планеты Венера, М., «Наука», 1974. <sup>7</sup> C. S. Weller, M. A. Biondi, Phys. Rev. Letters, v. 19, 59 (1967). <sup>8</sup> D. M. Butler, J. W. Chamberlain, Papers of VII Annual Meeting of American Astronomical Society, 30 March - 3 April, 1976, Austin, Texas, p. 35. <sup>9</sup> К. И. Грингауз и др., Косм. иссл., т. 12, 430 (1974). <sup>10</sup> Н. К. Осипов, Н. Б. Пиговарова, В. Г. Пиговаров, Магнитно-ионосферные возмущения и потоки авроральных электронов, М., «Наука», 1973. <sup>11</sup> Электродинамика плазмы, гл. 7, М., «Наука», 1974. <sup>12</sup> И. Мак-Даниель, Процессы столкновений в ионизированных газах, М., «Мир», 1967. <sup>13</sup> D. J. Strickland, A. E. S. Green, J. Geophys. Res., v. 74, 6415 (1969). <sup>14</sup> М. Я. Маров, О. Л. Рябов, Модель атмосферы Венеры, препринт ИПМ АН СССР, № 112, М., 1974. <sup>15</sup> М. Н. Изаков, С. К. Морозов, Косм. иссл., т. 13, 404 (1975).