

УДК 533.951.2

*В. В. Афонин**, *П. Бенце***, *В. В. Безруких**,
*Е. И. Грингауз**, *И. Сэмерей****, *Н. Ф. Смирнова**

НАБЛЮДЕНИЯ ПОТОКОВ ХОЛОДНЫХ ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМОСФЕРЫ В ИОНОСФЕРУ В НОЧНОЕ ВРЕМЯ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

На приборном контейнере ракеты «Вертикаль-10», запущенном 25.XII.1981 г. в 22.35 MLT на средних широтах, были установлены два анализатора с тормозящим потенциалом. Анализаторы, один из которых был ориентирован вверх, другой вниз, на участке падения контейнера от вершины траектории на высоте 1508 км до 1438 км зарегистрировали анізотропию токов, причем ток анализатора, ориентированного вверх, превышал ток анализатора, ориентированного вниз.

Полученные экспериментальные данные дают основание сделать вывод о том, что во время полета ракеты «Вертикаль-10» был зарегистрирован поток холодной плазмы из плазмосферы в ионосферу, скорость которого составляла $\sim 10^8$ м/с.

В настоящей статье приводятся результаты измерений скоростей и величин потоков холодных ионов из плазмосферы в ионосферу, выполненных при помощи системы из двух плоских электростатических анализаторов с тормозящим потенциалом (плоских ионных ловушек), установленных на приборном контейнере геофизической ракеты «Вертикаль-10». Ракета «Вертикаль-10» была запущена 25.XII.1981 г. в 18.35 UT, 22.35 MLT в районе г. Волгограда на траекторию, близкую к вертикальной (модуль скорости в вершине траектории не превышал 1 м/с).

Обмен потоками заряженных частиц между ионосферой и плазмосферой, являющийся одним из важнейших видов ионосферно-магнитосферных связей и, по-видимому, важным фактором, поддерживающим существование ночной ионосферы на средних широтах, изучался теоретически и экспериментально в течение ряда лет.

Парк на основе рассмотрения суточных вариаций экваториальных $n(L)$ -профилей, полученных по данным наблюдений свистящих атмосфериков, пришел к выводу о существовании потоков заряженных частиц тепловых энергий $\sim 1,5 \cdot 10^8$ см⁻²·с⁻¹ из плазмосферы в ионосферу ночью и $\sim 3 \cdot 10^8$ см⁻²·с⁻¹ из ионосферы в плазмосферу днем [1, 2]. По данным станции некогерентного рассеяния Миллстон — Хилл Эванс для $L=3,1$ получил величины потоков $5 \cdot 10^7$ см⁻²·с⁻¹ вверх и $3 \cdot 10^7$ см⁻²·с⁻¹ вниз для условий максимума солнечной активности [3, 4]. Согласно данным, полученным также в Миллстон — Хилл в условиях максимума солнечной активности днем на высоте 3000 км поток из ионосферы составляет $(5-7) \cdot 10^7$ см⁻²·с⁻¹, а ночью он направлен вниз, увеличиваясь в течение ночи до $\sim 1,5 \cdot 10^8$ см⁻²·с⁻¹ [11].

По данным станции некогерентного рассеяния в Аресибо Викри и др. получили, что на $L=1,4$ в ночное время величина потоков ионов H^+

* Институт космических исследований АН СССР.

** Институт геодезии и геофизики АН ВНР.

*** Центральный институт физических исследований АН ВНР.

в ионосферу в августе 1975 г. составляла $(2-6) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а в августе 1976 г. и январе 1977 г. величина потоков H^+ составляла $\sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [5, 6].

Как было показано в [7, 8], потоки холодной плазмы из плазмосферы могут поддерживать существование ионосферы в отсутствие солнечного УФ-излучения. Согласно оценкам авторов [7, 8], для поддержания максимума области F в ночное время на средних широтах необходимы потоки плазмы из плазмосферы вниз $\sim 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. С другой стороны, теоретические оценки величины потоков H^+ между ионосферой и плазмосферой, сделанные в ряде работ (например, [9, 10]), показывают, что на средних широтах потоки должны составлять $\sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Большое разнообразие теоретических оценок величин потоков между плазмосферой и ионосферой, а также трудности при интерпретации дан-

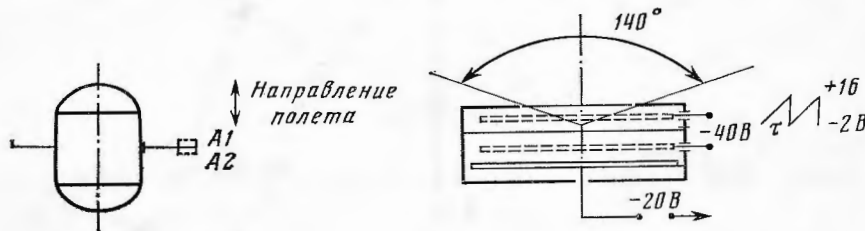


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 1. Схема расположения ловушек на контейнере с научной аппаратурой геофизической ракеты «Вертикаль-10»

Рис. 2. Схема ионной ловушки

ных, полученных методами некогерентного рассеяния, и отсутствие необходимых прямых (*in situ*) измерений дали основание автору современного (1983 г.) обзора [12] Хорвицу заключить: «Имеющиеся данные по главному вопросу в области ионосферно-плазмосферных связей, поддерживаются ли ночной F -максимум ионосферы потоками плазмы из плазмосферы, являются недоказательными».

1. Постановка эксперимента. На приборном контейнере ракеты «Вертикаль-10» на птанге длиной 1 м были установлены два плоских анализатора (рис. 1). Во время полета контейнер был полностью стабилизирован, причем его продольная ось была направлена по вертикали. Нормали к входным отверстиям анализаторов направлены параллельно продольной оси контейнера. Один из анализаторов — А1 — был ориентирован вверх, другой — А2 — вниз. В течение полета, продолжавшегося ~ 20 мин, регистрировались кривые торможения ионов в обоих анализаторах. Схема анализаторов и потенциалы на его электродах показаны на рис. 2. Угол обзора анализаторов составлял $\pm 70^\circ$, а угловая характеристика по форме была близка к косинусоидальной, что позволило при обработке экспериментальных данных использовать теорию плоского зонда.

Во время полета на анализирующие сетки обоих анализаторов синхронно подавались от одного источника пилообразные напряжения с размахом от -2 В до $+16$ В с периодом 2,5 с. Токи коллекторов анализаторов регистрировались с частотой 400 измерений в секунду.

2. Результаты измерений. Ток в цепи коллектора плоского анализатора, установленного на космическом аппарате, создается за счет его переносного движения в плазме, а также за счет теплового движения частиц или других движений плазмы. Поэтому в вершине траектории, где вертикальная скорость контейнера равна нулю, в изотропной плазме различным образом ориентированные плоские анализаторы должны регистрировать равные токи насыщения. На наклонном участке кривой торможения токи, измеренные двумя анализаторами, могут немного отличаться вследствие

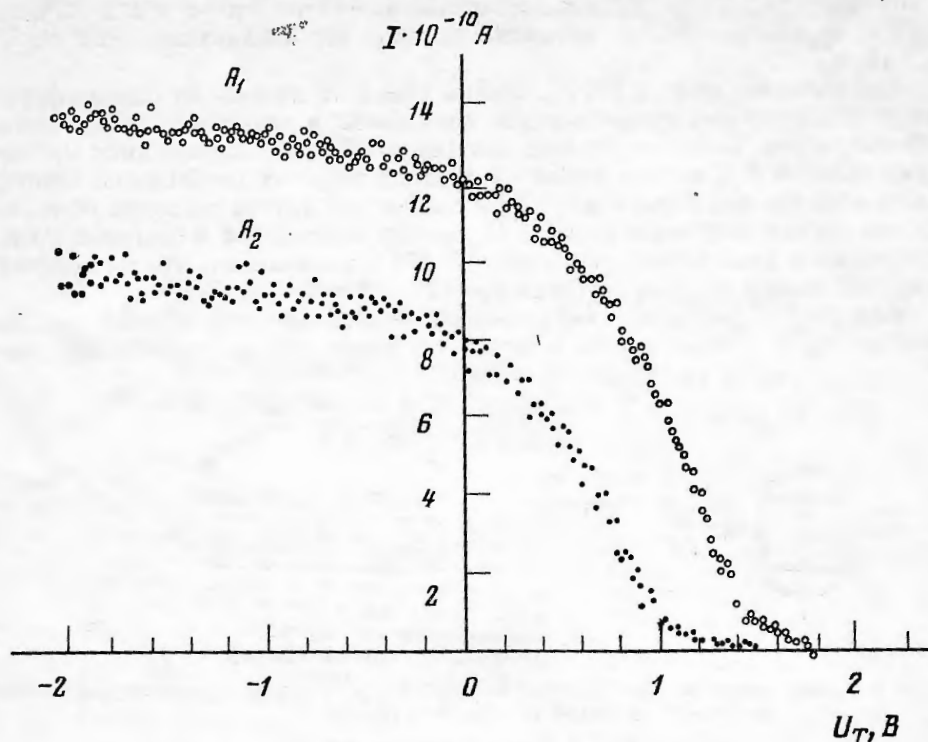


Рис. 3. Кривые торможения ионов в вершине траектории
 $H=1508$ км, $V=0,004$ км/с

неполного совпадения контактных разностей потенциалов на анализирующих сетках анализаторов.

Однако в эксперименте на ракете «Вертикаль-10» полностью идентичные по конструкции и характеристикам анализаторы А1 и А2 в вершине траектории при модуле скорости контейнера, равном 4 м/с, регистрировали существенно различные по величине токи насыщения. Ток насыщения анализатора А1, ориентированного вверх, превышал ток насыщения анализатора А2, ориентированного вниз, на $\sim 30\%$. Во время спуска контейнера, по мере увеличения его скорости ток анализатора А1 падал, ток анализатора А2 нарастал и только на высоте 1438 км при скорости контейнера 960 м/с токи насыщения обоих анализаторов сравнялись.

На рис. 3 приведены кривые торможения ионов, измеренные двумя анализаторами вблизи вершины траектории ракеты «Вертикаль-10» на высоте 1508 км при скорости контейнера 4 м/с; на рис. 4 — кривые торможения, измеренные на высоте 1438 км при скорости контейнера 960 м/с. Различие величин токов насыщения при скорости контейнера, близкой к нулю, и равенство их при скорости падения контейнера 960 м/с позволяют сделать несомненный вывод о том, что во время полета ракеты «Вертикаль-10» был зарегистрирован поток плазмы из плазмосферы в ионосферу, скорость которого составляла $\sim 10^3$ м/с. Заметим, что при координате $L=2$, соответствующей месту пуска ракеты, вертикаль на высотах 1000–1500 км практически совпадает с осью силовой трубки геомагнитного поля. Необходимо подчеркнуть, что на рассматриваемом участке траектории разность токов насыщения анализаторов А1 и А2 значительно флуктуировала при сохранении, однако, общей тенденции — уменьшения тока в ионной ловушке, направленной вверх, и роста в ловушке, направленной вниз.

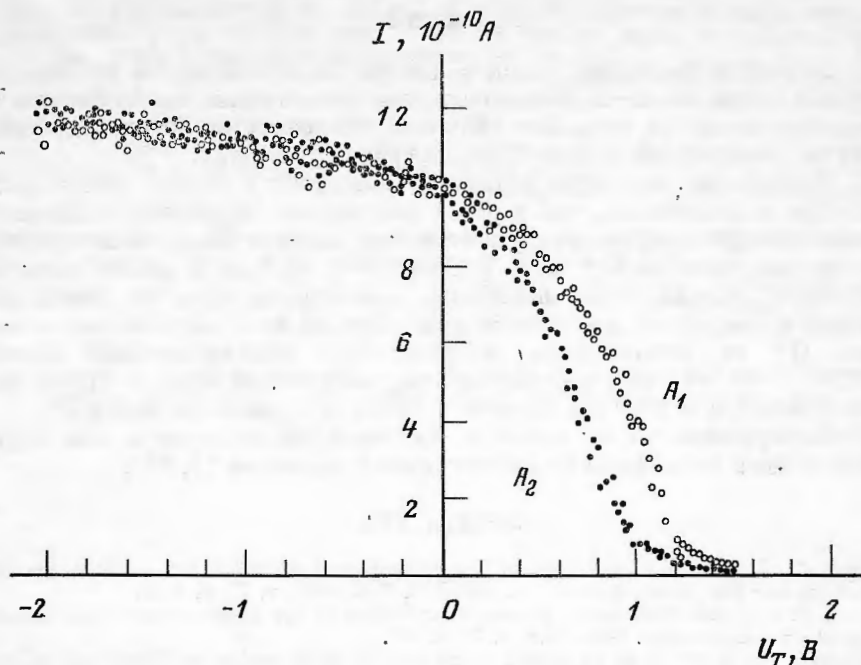


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для $H=1438$ км, $V=0,96$ км/с

Обработка кривых торможения проводилась методом подбора параметров (fitting-методом). При этом определялись концентрация и температура ионов, потенциал корпуса контейнера и скорость плазмы. Малая скорость контейнера на участке траектории от вершины до высоты 1000 км не позволила определить массовый состав ионов, поэтому обработка велась в предположении, что масса ионов $m_i=1$ а.е.м. Результаты обработки показали, что во время измерений температура ионов варьировалась в пределах 1600–2200 К, концентрация — в пределах $(4-7) \cdot 10^3$ см⁻³, потенциал корпуса контейнера был отрицательным и лежал в пределах $-(0,5-1,0)$ В, дрейф плазмы направлен вниз в ионосферу, а его скорость лежит в пределах от 0,8 до 1,4 км/с.

Результаты определения скорости плазмы приведены на рис. 5. Среднее значение скорости дрейфа плазмы V показано сплошной линией. Горизонтальные штрихи вверх и вниз рис. 5 показывают величину погрешности определения скорости плазмы. Разброс величин скоростей заведомо превышал возможные ошибки, из чего следует реальность этого разброса. Не исключено, что существование разброса скоростей дрейфа плазмы связано с наличием в ионосфере во время полета ракеты «Вертикаль-10» колебательных процессов, о чем свидетельствуют особенности измеренных кривых торможения, а также квазипериодические вариации электронной температуры, зарегистрированные установленной на этой ракете аппаратурой.

Величины потоков ионов из плазмосферы в ионосферу, соответствующие показанным на рис. 5 скоростям, лежат в пределах $(0,8-4,0) \cdot 10^8$ см⁻²с⁻¹.

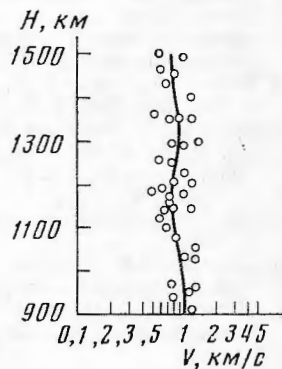


Рис. 5. Зависимость полученных величин скорости дрейфа плазмы в диапазоне высот 1500–900 км на участке спуска

Выводы

1. Измерены величины потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу в ночное время на $L \sim 2$. Насколько известно авторам эксперимента, эти измерения являются первыми прямыми измерениями потоков холодных ионов из плазмосферы в ионосферу на средних широтах.

2. Измеренные величины потоков в ионосферу в ночное время превышают как теоретические, так и ранее полученные экспериментальные (по данным метода некогерентного рассеяния) оценки. Возможной причиной этих расхождений может быть изменчивость потоков в цикле солнечной активности. Нельзя также исключить возможность того, что метод некогерентного рассеяния дает заниженные оценки из-за ослабления потоков ионов H^+ из плазмосферы в результате зарядообменной реакции $H^+ + O \rightarrow O^+ + H$, так как все результаты, полученные этим методом, относятся к высотам < 1000 км, где еще заметна концентрация ионов O^+ .

3. Измеренные потоки ионов из плазмосферы достаточны для поддержания ночной ионосферы (в соответствии с оценками [7, 8]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Park C. G. Wistler observation of the interchange of ionization between the ionosphere and the protonosphere.— *J. Geophys. Res.*, 1970, v. 75, p. 4249.
2. Park C. G. Some features of plasma distribution in the plasmasphere from Antarctic wistlers.— *J. Geophys. Res.*, 1974, v. 79, p. 169.
3. Evans J. V. A study of F_2 region night-time vertical ionization fluxes at Millstone Hill.— *Planet. Space Sci.*, 1975, v. 23, p. 1611.
4. Evans J. V., Holt J. M. Night time proton fluxes at Millstone Hill.— *Planet. Space Sci.*, 1978, v. 26, p. 727.
5. Vickrey J. F., Swartz W. E., Farley D. T. Incoherent scatter measurements of ion counterstreaming.— *Geophys. Res. Lett.*, 1976, v. 3, p. 247.
6. Vickrey J. F., Swartz W. E., Farley D. T. Postsunset observations of ionospheric — protonospheric coupling at Arecibo.— *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, p. 1310.
7. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Влияние изменяющегося ионосферно-протоносферного потока плазмы на ночную область F ионосферы.— *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1973, т. 13, с. 47.
8. Park C. G., Banks P. H. Influence of thermal plasma flow on the daytime F_2 layer.— *J. Geophys. Res.*, 1975, v. 80, p. 2819.
9. Mayr H. G., Fonthelm E. G., Brace L. H., Brinton H. C., Taylor H. A., Jr. A theoretical model of the ionosphere dynamics with interhemispheric coupling.— *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1972, v. 34, p. 1659.
10. Banks P. M., Nagy A. F., Azford W. J. Dynamical behavior of thermal protons in the mid-latitude ionosphere and magnetosphere.— *Planet. Space Science*, 1971, v. 19, p. 1053.
11. Marubashi K., Grebowsky J. H. A model study of diurnal behavior of the ionosphere and protonosphere coupling.— *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 81, p. 1700.
12. Horwitz J. L. Major questions on the interchange of thermal plasmas between the ionosphere and plasmasphere.— *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1983, v. 45, p. 765.

Поступила в редакцию
24.VIII.1984