

УДК 533.951.2

Н. М. Шютте

НАБЛЮДЕНИЯ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ НА НИЗКИХ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Приведены экспериментальные данные по наблюдениям потоков заряженных частиц с энергиями от 0,1 до 20 кэВ вблизи экватора. Интенсивность и энергетические спектры этих потоков сравнимы с регистрируемыми обычно в авроральных областях. Установлена взаимосвязь параметров этих потоков с напряженностью геомагнитного поля.

В работе представлены результаты измерений потоков заряженных частиц с энергиями от 100 до 20 000 эВ, полученные на спутнике «Космос-900» в области низких и экваториальных широт во внутренней магнитосфере. Спорадические, интенсивные потоки частиц кэВ-ных энергий на низких широтах наблюдались и ранее рядом авторов [1-7], однако неоднозначная природа этих частиц [3-7], а в некоторых случаях и спорность полученных результатов [1, 3, 8] не привлекли к ним достаточное внимание. Кроме того, практически нет данных о наблюдении таких потоков в дневное время.

Описание эксперимента. Спутник «Космос-900» был запущен на полярную геоцентрическую орбиту 30.III 1977 г. с апогеем 522,9 км, перигеем 460 км, наклоном 82,93°. Объект имел жесткую трехосную ориентацию, его продольная ось была всегда перпендикулярна земной поверхности.

Дифференциальные энергетические спектры положительных и отрицательных частиц (ионов и электронов) в диапазоне энергий $100 \text{ эВ} \leq E \leq 20 \text{ кэВ}$ снимались при помощи двух идентичных электростатических анализаторов [9], расположенных вдоль продольной оси объекта таким образом, что нормали к их входным окнам были направлены в противоположные стороны и составляли с этой осью угол 22° . Угловая диаграмма направленности в двух взаимно перпендикулярных направлениях составляла $3 \times 10^\circ$.

Пройдя двухцелевой коллиматор, заряженные частицы поворачивались на 180° в отклоняющем плоскопараллельном поле электростатического анализатора, после чего пространственно разделенный по энергиям поток регистрировался одновременно пятью чувствительными элементами. Величины энергий частиц, фиксировавшихся каждым последующим чувствительным элементом, монотонно возрастали, изменяясь в конечном счете в 5 раз.

В качестве чувствительных элементов были использованы каналные электронные умножители типа линейной спирали, работающие в режиме насыщения. Регистрация осуществлялась в режиме счета отдельных импульсов одновременно на двух уровнях дискриминации выходного сигнала с целью контроля динамических изменений амплитудного распределения КЭУ. Максимальная погрешность передачи зафиксированного числа импульсов не превышала 6%.

Анализиру...
ле энергии E
решение по эн
Полный цикл
пеней для эле
Спектральные
тия каждого
мости от реж
ратуры состав
На некоторых
ра информаци
получена с
энергии $\sim 10^4$
Пороговая
анализаторов
 $\cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$
уменьшалась
 $\cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$

Результаты
сываемые ре
ний относятся
и охватывают
так и возмущ
ные условия.
тов спутника
и приэкватор
($L \leq 2,5$) спек
рировали зна
заряженных
ность которых
 $L \leq 1,2$. На ри
меры, энергет
для северной
диапазоне $L \approx$
географическ
 $\approx 235^\circ$, наблю
день в очень
нитных услов
тельность рег
такого спект
Видно, что х
ческих распр
лах рассмат
ла изменени
целом доволь
частиц меньш
шается, инте
изменной. Ку
потоки ионов
гистрируемы
правление —

Энергетич
возмущенный
ции каждого

Сравнени
условий свид
ионные спек
ной активнос

Анализирующие напряжения последовательно изменялись в интервале энергий E от ~ 100 до ~ 4000 эВ, делившемся на восемь уровней. Разрешение по энергиям составляло $3 \div 17\%$ в зависимости от номера канала. Полный цикл изменения анализирующих напряжений состоял из 8 ступеней для электронов и, симметрично, таких же 8 ступеней для ионов. Спектральные распределения фиксировались последовательно, время снятия каждого 40-точечного спектра для частиц каждого знака в зависимости от режима работы аппаратуры составляло 20 или 160 с. На некоторых участках спектра информация о потоках была получена с разрешением по энергии $\sim 10 \div 20$ В.

Пороговая чувствительность анализаторов равнялась $10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$ для $E \geq 500$ эВ и уменьшалась до $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$ для $E \leq 500$ эВ.

Результаты измерений. Описываемые результаты измерений относятся к апрелю 1977 г. и охватывают как спокойные, так и возмущенные геомагнитные условия. Для ряда оборотов спутника в области низких и приэкваториальных широт ($L \leq 2,5$) спектрометры регистрировали значительные потоки заряженных частиц, интенсивность которых возрастала для $L \leq 1,2$. На рис. 1 показаны примеры энергетических спектров для северного полушария в диапазоне $L \approx 1,6 \div 1,09$ и вблизи географической долготы $\lambda \approx 235^\circ$, наблюдавшиеся в полдень в очень спокойных геомагнитных условиях ($K_p=1$). Длительность регистрации каждого такого спектра составляла 20 с. Видно, что характер энергетических распределений в пределах рассматриваемого интервала изменения параметра L в целом довольно стабилен. Можно отметить, что с уменьшением L доля частиц меньших энергий несколько возрастает, а более высоких — уменьшается, интегральная интенсивность остается при этом практически неизменной. Кроме того, практически равными оказываются интегральные потоки ионов и электронов. Следует добавить также, чтоpitch-углы регистрируемых потоков были близки к 90° , а их преимущественное направление — в сторону Земли.

Энергетические распределения ионов и электронов, наблюдавшиеся в возмущенный период 6.IV 1977 г. ($K_p=7$; $\lambda \approx 207^\circ$, длительность регистрации каждого спектра также составляла 20 с), показаны на рис. 2.

Сравнение результатов измерений для спокойных и возмущенных условий свидетельствует о том, что в обоих случаях для $L \approx 1,09 \div 1,13$ ионные спектры были очень похожими, т. е. мало зависели от геомагнитной активности, тогда как электронные — существенно различны. В слу-

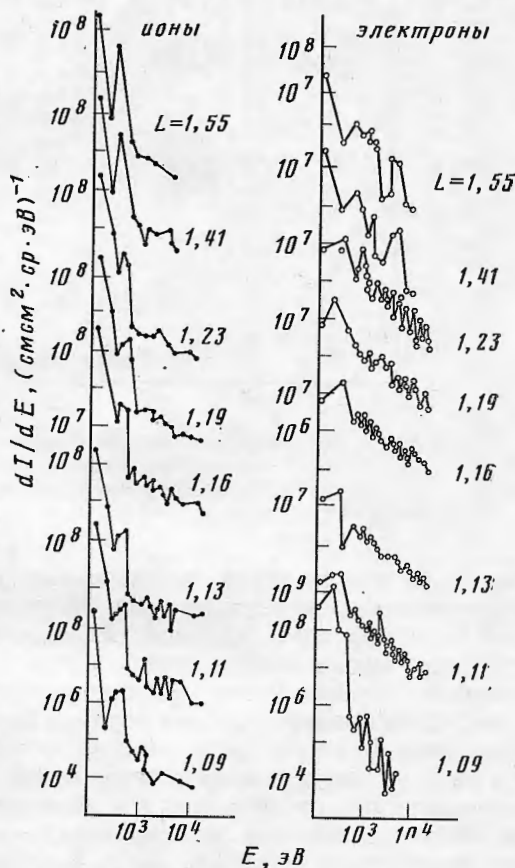


Рис. 1. Энергетические спектры ионов и электронов, зарегистрированные в северном полушарии Географическая долгота $\lambda \approx 235^\circ$; $K_p=1$; диапазон изменения параметра $L \approx 1,6 \div 1,09$

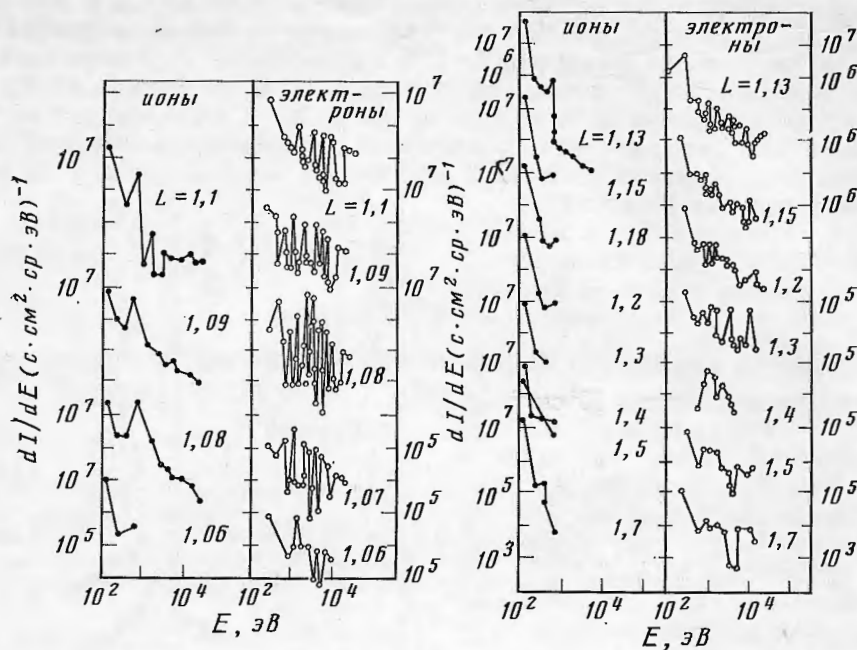


Рис. 2. То же самое, что на рис. 1
 Географическая долгота $\lambda \approx 207^\circ$; $K_p=7$; диапазон изменения параметра $L \approx 1,7 \div 1,06$

чае $K_p=7$ имели место значительные временные флуктуации потоков электронов с энергиями от сотен эВ до нескольких кэВ, амплитуда которых достигала трех порядков. Характерно также, что для $L \geq 1,7$ такие колебания интенсивности наблюдались и в спокойных условиях. Максимальные интенсивности низкоэнергичных потоков ($E \leq 300$ эВ) при $K_p=7$ были примерно на два порядка меньше, чем в спокойных условиях, а высокоэнергичная часть ионных спектров менее устойчива. В обоих случаях можно проследить некоторую симметрию в изменении формы энергетических распределений в зависимости от L , а также постоянство формы энергетических распределений — при меньших значениях энергий интенсивность всегда была более высокой. Характерно также, что в области энергий $E \leq 500$ эВ наблюдаемые в энергетических распределениях всплески интенсивности для ионов и электронов были в противофазе.

Следует отметить, что в стационарных, спокойных геофизических условиях приэкваториальные потоки заряженных частиц иногда наблюдались сравнительно длительное время (на протяжении восьми оборотов спутника, т. е. примерно 12 ч) в широком диапазоне долгот (от 68° до 238°), без заметных изменений интенсивности и формы энергетических распределений. На рис. 3 приведены распределения для электронов и ионов, полученные подряд на протяжении шести витков на дневной стороне орбиты вблизи экватора для $L \approx 1,03 \div 1,1$ (длительность регистрации одного полного спектра при этом равнялась 160 с). Видно, что энергетические распределения были для всех этих оборотов спутника одинаковы и мало отличаются от представленных ранее на рис. 1 и 2; в диапазоне изменения параметра $L \approx 1,01 \div 1,15$ форма распределения оставалась неизменной.

Как правило, в спокойных условиях дневные потоки были более стабильные, чем ночные, и в отличие от ночных имели более четко выраженную зависимость от L . С ростом геомагнитной активности нестационарность экваториальных потоков возрастала, что затрудняло возможность их практической регистрации в ночное время. Кроме того, в ночное

время
 потоков
 ний,
 $\approx 0 \div$
 мя л
 а по
 варь
 О
 пото

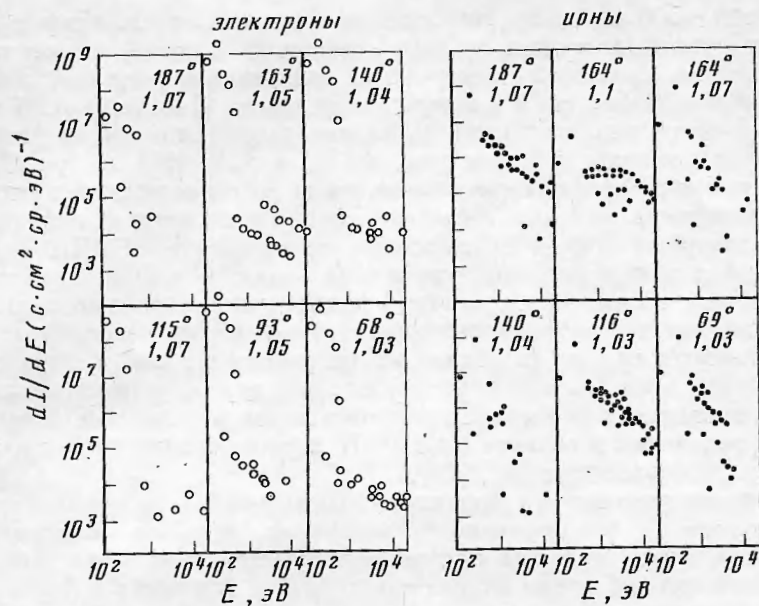


Рис. 3. Долготная зависимость энергетических распределений приэкваториальных дневных потоков электронов и ионов ($K_p=1$). Вверху указана долгота λ , внизу — значение L

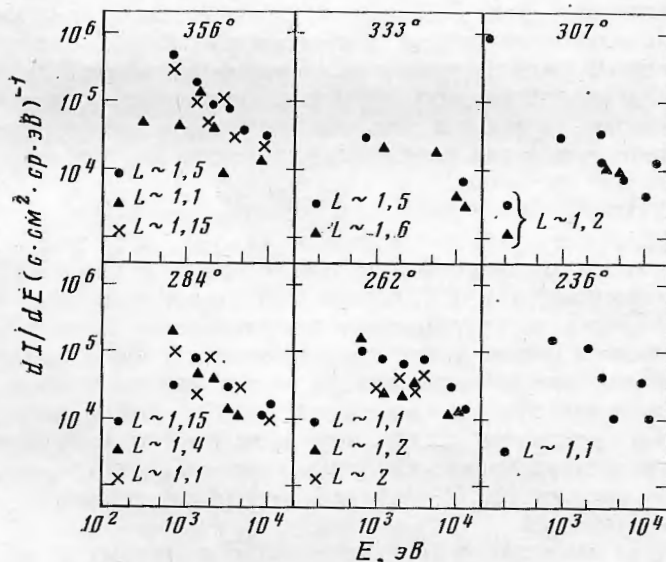


Рис. 4. Энергетические распределения ночных ионных потоков для различных долгот λ , указанных сверху ($K_p=1$)

время практически не наблюдались одновременно близкие по величине потоки электронов и ионов. Примеры ионных энергетических распределений, полученных на разных долготах 1 и 2.IV 1977 г. при $K_p=1$ и $MLT \approx 0 \div 0,5$ ч, продемонстрированы на рис. 4. Электронные потоки в это время либо отсутствовали, либо носили исключительно случайный характер, а ионные спектры практически не зависели от L и B , значения которых варьировались от 1,09 до 1,8 и от 0,22 до 0,4 Гс соответственно.

Обсуждение результатов измерений и выводы. Приэкваториальные потоки заряженных частиц с энергиями, меньшими 20 кэВ, наблюдались

на высотах ~ 500 км спорадически как в дневное время, так и ночью. Анализ полученных данных не дает оснований полагать, что их появление однозначно связано с геомагнитной активностью: потоки наблюдались как в спокойное, так и в возмущенное время. Например, 1.IV 1977 г. при $K_p=1$ были зарегистрированы интенсивные потоки с энергиями от сотен эВ до десятков кэВ (см. рис. 1, 3), а 8.IV 1977 г. при $K_p \approx 5 \div 4$ в том же самом географическом районе и в то же самое местное время — потоков практически не было. Нерегулярность таких потоков отмечалась и другими авторами. Так, в специальном эксперименте ЭКВИН [10], который проводился в условиях умеренной геомагнитной активности при $K_p=3^+$, потоки вблизи экватора также практически не наблюдались.

В то же время такие характерные параметры низкоширотных потоков заряженных частиц (в случае их наблюдения), как экспоненциальный характер энергетических распределений, вариации интенсивности в пределах нескольких порядков, противофазность максимумов энергетических распределений в области $E \leq 1000$ В, хорошо согласуются с данными различных экспериментов [3, 7, 11].

Анализ полученных на спутнике «Космос-900» экспериментальных данных показал, что вероятность появления, а также интенсивность дневных приэкваториальных потоков существенно связаны с напряженностью геомагнитного поля вблизи экватора B_{eq} . А именно в большинстве случаев зоны регистрации таких потоков соответствовали минимальным значениям B_{eq} . Более того, при регистрации приэкваториальных потоков имела место некоторая зависимость между пространственным распределением интенсивности этих потоков вдоль одной долготы и напряженностью геомагнитного поля B . А именно в сопряженных точках, расположенных вдоль одного меридиана в области $L \approx 1,1 \div 1,2$, наибольшим величинам потоков Φ соответствовали наименьшие значения B_{eq} .

Взаимосвязь низкоширотных потоков с напряженностью геомагнитного поля проявилась также и в том, что практически всегда описываемые потоки электронов и ионов наблюдались при пролете спутником района Южной магнитной аномалии.

Характеристики низкоширотных и приэкваториальных потоков неоднократно обсуждались разными авторами [1–11], проводились сопоставления многочисленных ракетных и спутниковых измерений (как прямых, так и косвенных) [12, 13], однако четкого представления о природе, условиях появления и длительности существования этих потоков пока нет. Высказанные в разное время предположения о вероятном высыпании ионов кольцевого тока, попадающих на малые экваториальные высоты в результате зарядо-обменных взаимодействий с нейтральным водородом [2, 12, 13], изменения состава низкоширотной плазмы малых высот во время фазы восстановления суббури за счет обогащения ее тяжелыми ионосферными ионами [2, 14–16] не в состоянии полностью объяснить результаты наблюдений.

Совокупность имеющихся экспериментальных данных позволяет предполагать, что источником наблюдаемых высыпаний заряженных частиц на низких и экваториальных широтах может быть как ионосфера, так и кольцевой ток. Кроме того, характеристики этих потоков позволяют предполагать и влияние эффектов взаимодействия волна—частица, которые, как известно, могут быть причиной интенсивного нагрева окружающей плазмы до энергий в сотни вольт — десятки киловольт, с одной стороны, и резонансного рассеяния квазизахваченных частиц — с другой. Рассматривая возможные причины, условия возникновения и существование таких потоков, следует иметь в виду и то обстоятельство, что искажения геомагнитного поля, связанные с его уменьшением по сравнению с дипольным, должны сопровождаться уменьшением неадиабатических потерь заряженных частиц. Поэтому не исключено, что наблюдаемое в эксперименте увеличение интенсивности, а также вероятности появления низко-

широтных
сравнительно
аномалий
сильной
нений ге

1. Freeman, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
2. Mizera, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
3. Heikkila, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
4. Krassovskiy, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
5. Knudsen, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
6. Hill, R. J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
7. Prangé, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
8. Winn, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
9. Shuttleworth, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
10. Morse, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
11. Hovestadt, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
12. Voss, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
13. Paulik, J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 107
14. Blake, J. Geophys. Res., 1976, 81, p. 107
15. Tinsley, J. Geophys. Res., 1976, 81, p. 107
16. Lyons, J. Geophys. Res., 1976, 81, p. 107

широтных потоков при уменьшении напряженности геомагнитного поля, сравнительно регулярная их регистрация на долготах Южной магнитной аномалии, наличие асимметрии день-ночь могут быть проявлением сильной пич-угловой и радиальной диффузии плазмы вследствие отклонений геомагнитного поля от дипольного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Freeman J. W. Detection of an intense flux of low-energy protons or ion trapped in the inner zone.— J. Geophys. Res., 1962, v. 67, p. 921.
2. Mizera P. F., Blake J. B. Observations of ring current protons at low altitudes.— J. Geophys. Res., 1973, v. 78, p. 1058.
3. Heikkila W. J. Soft particles fluxes near the equator.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, p. 1076.
4. Krassovskii V. I. et al. Investigations of the upper atmosphere using the artificial earth satellites Cosmos — 3 and Cosmos — 5.— Space Res., 1964, v. 4, p. 572.
5. Knudsen W. C. Geographic distribution of F region electrons with about 10-eV energy.— J. Geophys. Res., 1968, v. 73, p. 841.
6. Hill R. W. et al. Soft particle flux above 130 km at midlatitude.— J. Geophys. Res., 1970, v. 75, p. 7267.
7. Prange R. Energetic (keV) ions of ionospheric origin in the magnetosphere.— Ann. Geophys., 1978, v. 34, p. 187.
8. Winningham J. D. Low energy (10 eV to 10 keV) equatorial particle fluxes, Proceeding of the Workshop on Electron Contamination in X — Ray Astronomy Experiments/Ed. Holt S. S. NASA GSFC Rep., 1974, X-661-74-130.
9. Shutte N. M. et al. High and low latitude energy spectra of protons and electrons precipitating into the ionosphere observed with the satellite «Cosmos-900».— Space Res., 1979, v. 19, p. 357.
10. Morse F. A. et al. Equin, an equatorial ionospheric irregularity experiment.— J. Geophys. Res., 1977, v. 82, p. 578.
11. Hovestadt D. B. et al. Observation of energetic particles at very low attitudes near the geomagnetic equator.— Phys. Rev., 1972, v. 28, p. 1340.
12. Voss H. D., Smith L. G. Global zones of energetic particle precipitation.— J. Atmos. Terr. Phys., 1980, v. 42, p. 227.
13. Paulikas G. A. Precipitation of particles at low and middle latitudes.— Rev. Geophys. Space Phys., 1975, v. 13, p. 709.
14. Blake J. B. On the ionic identity of the ring current particles.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 6189.
15. Tinsley B. A. Evidence that the recovery phase ring current consists of helium ions.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 6193.
16. Lyons L. R., Evans D. S. The inconsistency between proton charge exchange and the observed ring current decay.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 6197.

Поступила в редакцию
2.III.1984