

7. *McNamara L. F., Wright C. S. Solar Phys.*, 1983, v. 84, p. 289.

8. *Roelof E. C., Dodson H. W., Hedeman E. R. Dependence of radio emission in large H_{α} flares 1967–1970 upon the orientation of the local solar magnetic field* Prepr. APL/JHU, 82–25; 1982, p. 17.

Ленинградский государственный университет

Поступила в редакцию
31.X.1983

Геомагнетизм и аэронавтика

1984 г. - Т. 24. - №5. - С. 818 - 920

УДК 550.383

ВСПЛЕСКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА МАГНИТОПАУЗЕ И ВО ВНЕШНЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ

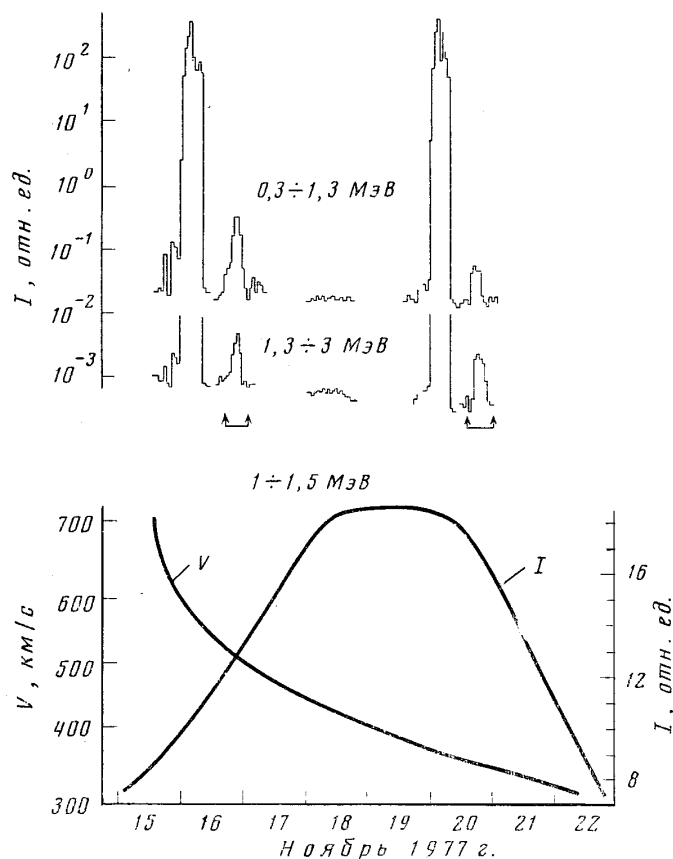
*Безродных И. П., Бережко Е. Г., Морозова Е. И., Писаренко Н. Ф.,
Плотников И. Я., Шафер Ю. Г.*

Введение. Во внешнем радиационном поясе Земли (РПЗ) неоднократно наблюдались возрастания интенсивности релятивистских электронов, обусловленные увеличением скорости солнечного ветра. Из наблюдений на орбите геостационарного спутника (ГС) следует, что максимум интенсивности электронов запаздывает на 2–3 сут относительно максимума скорости солнечного ветра [1, 2].

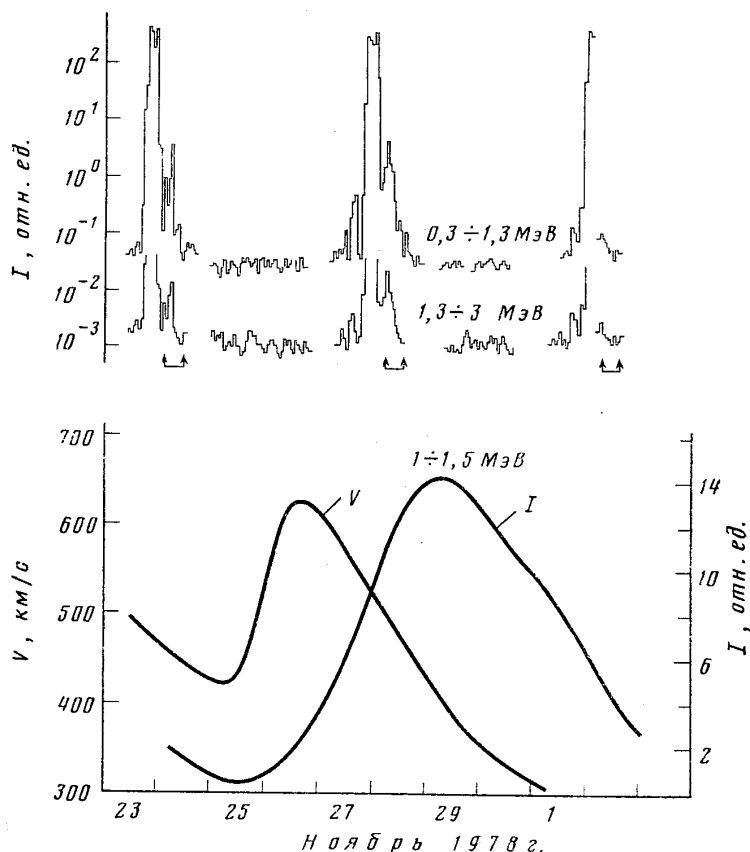
Динамика релятивистских электронов представляет интерес в связи с возможностью их генерации в переходной области магнитосферы. Действительно, вблизи магнитопаузы постоянно регистрируются значительные потоки электронов с энергиями $\epsilon_e \leq 1$ МэВ, происхождение которых в настоящее время не установлено: они не связаны ни с всплесками электронов в межпланетной среде [3, 4], ни с электронами, ускользающими из внешнего РПЗ [5].

В данной работе сопоставляются одновременные наблюдения потоков релятивистских электронов на орбите ГС и вблизи магнитопаузы.

Результаты. За период 1977–1979 гг. зарегистрировано более 10 событий возрастания интенсивности электронов с $\epsilon_e = 1 \div 1,5$ МэВ по данным ГС «Радуга» и электронов с $\epsilon_e = 0,3 \div 1,3$ МэВ, $1,3 \div 3$ МэВ вблизи магнитопаузы по данным ИСЗ «Прогноз-6»,



Фиг. 1



Фиг. 2

«Прогноз-7». Всем событиям предшествовало увеличение скорости солнечного ветра.

На фиг. 1 приведено одно из типичных событий, зарегистрированное во второй половине ноября 1977 г., а на фиг. 2 — событие конца ноября 1978 г. В верхней части фиг. 1 и 2 представлены интенсивности электронов с $\epsilon_e = 0,3 \div 1,3$ и $1,3 \div 3$ МэВ, измеренные ИСЗ «Прогноз-6», «Прогноз-7», а в нижней — временные профили скорости солнечного ветра [6] и интенсивности электронов с $\epsilon_e = 1 \div 1,5$ МэВ на дневной стороне геостационарной орбиты. Скобками отмечены всплески электронов, зарегистрированные при выходе ИСЗ из магнитосферы. Видно, что между интенсивностью электронов вблизи магнитопаузы и скоростью солнечного ветра V имеется тесная связь: амплитуда всплесков электронов растет с увеличением V . Кроме того, из фиг. 1, 2 видно, что амплитуда всплесков электронов, регистрируемых при выходе ИСЗ из магнитосферы, выше, чем при входе. Поскольку орбиты ИСЗ «Прогноз-6», «Прогноз-7» в эти периоды времени были ориентированы так, что точка входа располагалась ближе к лобовой части магнитосферы, можно сделать вывод, что интенсивность электронов вблизи магнитопаузы возрастает по мере удаления от ее лобовой части.

Обсуждение. Наблюдаемые особенности возрастаний плотности релятивистских электронов вблизи магнитопаузы и во внешнем РПЗ свидетельствуют о тесной взаимосвязи этих двух явлений со скоростью солнечного ветра, а наличие вблизи магнитопаузы слоя сдвигового течения плазмы [7] указывает на то, что происхождение релятивистских электронов может быть обусловлено процессом их фрикционного ускорения в слое [8, 9].

Рассмотрим эту возможность на основе количественных оценок. Слой, занятый сдвиговым течением плазмы, непосредственно прилегает к магнитопаузе и имеет характерную толщину $l \approx 0,1 R_E$ (R_E — радиус Земли) на дневной стороне геомагнитосферы [7]. Высокоэнергичная часть тепловых электронов, имеющих пробег $\lambda \sim l$, будет эффективно ускоряться посредством фрикционного механизма в процессе их конвективного переноса вдоль слоя, начиная с лобовой части магнитосферы. При этом средняя энергия электронов ϵ растет в соответствии с выражением [8, 9]:

$$d\epsilon/dt = \epsilon/T, \quad T \approx (l/\Delta V)^2 v/\lambda,$$

где ΔV — перепад скорости плазмы поперек слоя, v — скорость электронов. Значения параметров l и ΔV меняются вдоль слоя. Кроме того, величина λ может изменяться по мере роста энергии электронов. Для простоты предположим, что величина

$(\Delta V/l)^2 \lambda$ остается постоянной, если считать, что электроны в среднем передвигаются вдоль слоя со средней скоростью $\langle V \rangle \approx \Delta V/2$. Тогда, проинтегрировав уравнение для энергии электронов от значения $t=0$ (лобовая точка магнитосферы) до $t=L/\langle V \rangle$, где L — расстояние вдоль слоя от лобовой точки до места наблюдения, получим:

$$\epsilon = (m/8) [(\Delta V/l)^2 \lambda L / \langle V \rangle]^2,$$

где m — масса электрона. Принимая $l \leq 0,1 R_E$, $\lambda \sim l$, $\Delta V = 6 \cdot 10^7$ см/с, получаем, что на расстоянии $L \approx 30 R_E$ средняя энергия электронов $\epsilon \approx 0,1$ МэВ.

Таким образом, можно ожидать, что в процессе фрикционного ускорения вблизи магнитосферы формируется степенной спектр электронов $I(\epsilon) \sim \epsilon^{-1}$ (именно такая форма спектра характерна для фрикционного механизма ускорения [9]) в области энергий $\epsilon \leq \epsilon_m(L)$, где величина энергии $\epsilon_m(L)$ для $L \sim 30 R_E$ и скорости солнечного ветра $V \approx 600$ км/с составляет $\epsilon_m(L) \approx 0,1$ МэВ. Это предсказание не противоречит результатам измерений, представленным на фиг. 1 и 2: в обоих случаях эксперимент показывает быстрое спадание числа частиц с $\epsilon > 0,3$ МэВ.

Эффективность процесса фрикционного ускорения растет с увеличением скорости солнечного ветра, поскольку растет перепад скорости $\Delta V \approx V$ плазмы поперек слоя сдвигового течения. Этим можно объяснить наблюдаемую взаимосвязь интенсивности электронов у магнитопаузы и скорости солнечного ветра.

Электроны, ускоренные вблизи магнитопаузы, благодаря рассеяниям могут попадать в область квазизахвата в хвостовой части геомагнитосферы, где они испытывают дрейфовое движение поперек хвоста, а также процесс радиальной диффузии, за счет которого электроны проникают в область радиационных поясов.

Учитывая, что коэффициент радиальной диффузии релятивистских электронов составляет $D_L \sim 1$ сут $^{-1}$ [10], следует ожидать, что возрастание интенсивности электронов в области внешнего РПЗ будет происходить позже соответствующего возрастания вблизи магнитопаузы на ~ 1 сут. Наблюдаемая задержка максимума возрастания интенсивности электронов на геостационарной орбите по отношению к времени достижения максимума скорости солнечного ветра $\sim 2,5$ сут не противоречит предлагаемой нами модели.

Для детального сопоставления модели с экспериментом необходимы более полные данные о структуре слоя сдвигового течения на всем его протяжении от лобовой части до места наблюдения и сведения о величине длины свободного пробега λ электронов в этой области. С другой стороны, желательно иметь измерения временного хода возрастания интенсивности электронов одновременно в различных участках слоя.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наличие релятивистских электронов вблизи магнитопаузы может обеспечиваться фрикционным процессом их ускорения в прилежащем к магнитопаузе слое сдвигового течения плазмы солнечного ветра. С возрастанием скорости солнечного ветра эффективность механизма ускорения увеличивается, что и приводит к возрастанию интенсивности электронов. Диффузионное проникновение этих электронов во внутреннюю область магнитосферы обуславливает наблюдаемое возрастание интенсивности релятивистских электронов во внешнем РПЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродных И. П., Шафер Ю. Г. Космические исследования, 1982, 20, 639.
2. Безродных И. П., Шафер Ю. Г. Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1983, 47, 1684.
3. Луценко В. Н., Николаева Н. С., Писаренко Н. Ф., Шестопалов И. П. Проблемы солнечной активности и космическая система «Прогноз». М.: Наука, 1977, с. 231.
4. Минеев Ю. В., Спирькова Е. С., Шестопалов И. П. Космические исследования, 1981, 19, 780.
5. Fan G. Y., Gloeckler G., Simpson J. A. J. Geophys. Res., 1966, 71, 1837.
6. King J. H. Interplanetary medium Data book — Suppl. 1, NSSDC, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 1979.
7. Сергеев В. А., Цыганенко Н. А. Магнитосфера Земли. М.: Наука, 1980.
8. Бережко Е. Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 416.
9. Бережко Е. Г., Крымский Г. Ф. Письма в астроном. журн., 1981, 7, 636.
10. Ажосфу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1975.

Институт космофизических исследований
и аэронавтики Якутского филиала СО АН СССР

Поступила в редакцию
9.XI.1983