

УДК 523.165

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2015 г. Е. И. Дайбог¹, К. Кечкемети², Л. Л. Лазутин¹, Ю. И. Логачев¹, Г. М. Сурова¹

E-mail: daibog@srd.sinp.msu.ru

На больших расстояниях (20 Re и более) от Земли измерения потоков частиц в магнитосфере проводится крайне редко, а их динамика важна для понимания механизмов проникновения солнечных частиц в магнитосферу Земли. Орбита и приборы спутника Земли IMP-8 позволяют восполнить этот пробел. Проведен анализ потоков электронов МэВ-ных энергий в разных областях орбиты: внутри и вне магнитосферы, а также при входе и выходе из нее. В спокойные периоды в хвосте магнитосферы наблюдаются всплески потоков электронов, источниками которых могут быть ускорение в магнитосфере, проникновение галактических и солнечных частиц, а также электронов из магнитосферы Юпитера.

DOI: 10.7868/S0367676515050191

ВВЕДЕНИЕ

Проблема происхождения электронов субрелятивистских и релятивистских энергий внутри магнитосферы Земли и в ее хвосте обсуждалась неоднократно (см., например, [1]). Вопрос стоял об альтернативе: сама магнитосфера Земли является эффективным ускорителем электронов или их рекуррентным источником является магнитосфера Юпитера. После обнаружения юпитерианских электронов на космических зондах PIONEER-10 и -11, всплески юпитерианских электронов были зарегистрированы в 1973–1974 гг. и на спутнике IMP-7 [2].

Было замечено [3], что часто во время спокойных геомагнитных периодов спектры электронов с энергией 0.2–2.0 МэВ в степенном представлении, усредненные за сутки, с 27-дневной периодичностью ужестчаются с $\gamma \sim 3-4$ до $\gamma \leq 2$. Также отмечалась 13-месячная периодичность максимальной интенсивности этих электронов. Все это свидетельствует о том, что временами существенный вклад в популяцию электронов магнитосферы Земли могут давать юпитерианские электроны. В то же время на Imp 8 были получены очевидные свидетельства присутствия в хвосте магнитосферы локализованных областей ускорения электронов до энергий $E > 200$ кэВ [4]. В связи с этим возникает вопрос о проникновении юпитерианских электронов в хвост магнитосферы и о соотношении

там популяций юпитерианских и ускоренных в магнитосфере электронов.

В настоящей работе использованы данные по измерению электронов в 1996–2001 годах, когда работали два аппарата: IMP-8 и SOHO, что позволило провести сравнение потоков электронов внутри и вне магнитосферы. До запуска SOHO изучались данные только спутника IMP-8, работа которого охватывала период с 1973 по 2001 гг.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ

Надежная регистрация юпитерианских электронов возможна только во время спокойных периодов на Солнце, поскольку их потоки лишь в несколько раз превышают фоновые и основное внимание было уделено периодам минимумов солнечной активности. Особый интерес представляет период минимума СА 1995–1997 гг., когда сошлась благоприятная ситуация для изучения потоков электронов МэВ-ных энергий: в космосе работали одновременно два аппарата с почти одинаковыми приборами, но расположенные в существенно различных точках относительно магнитосферы Земли: SOHO в точке Лагранжа L1 (250 Re в направлении к Солнцу) и IMP-8 – спутник Земли с $R \approx 25-45$ Re, около 40% времени находившийся в хвосте магнитосферы [5]. Сравнение показаний приборов CRNC (IMP-8) в хвосте магнитосферы Земли и EPHIN (SOHO), вне магнитосферы, позволяет выделить электроны магнитосферного происхождения, что, в свою очередь, дает возможность более надежно отождествить юпитерианские электроны и позволяет судить об источниках ускоренных электронов в магнитосфере Земли до МэВ-ных энер-

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

² Вигнеровский исследовательский физический центр, Будапешт, Венгрия.

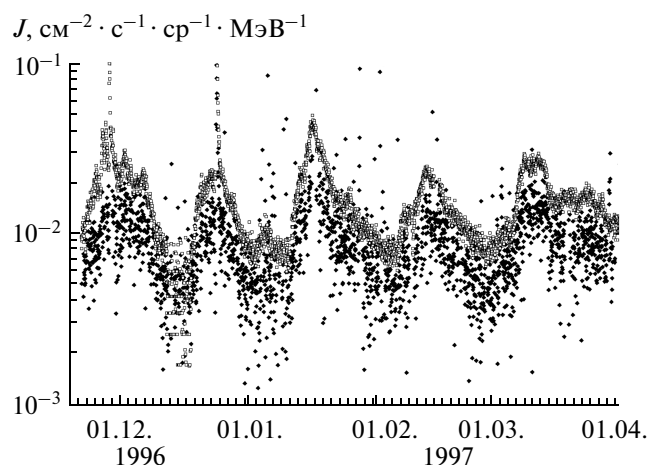


Рис. 1. Потоки электронов на IMP-8 (0.7–2 МэВ, темные ромбы) и на SOHO (0.7–3 МэВ, светлые квадраты) в период спокойного Солнца в конце 1997 года. 27-дневная волна – электроны юпитерианского происхождения. Рисунок демонстрирует хорошее согласие регистрации юпитерианских электронов на обоих аппаратах. На спутнике IMP-8 видны также возрастания потоков электронов, не зарегистрированные на SOHO, что говорит об их магнитосферной природе.

гий и переносе их в отдаленные области хвоста магнитосферы до 30–40 Re.

Рисунок 1 демонстрирует хорошее согласие регистрации юпитерианских электронов на обоих аппаратах, а на IMP-8 (0.7–2 МэВ) видны также возрастания потоков электронов, не зарегистрированные на SOHO (0.7–3 МэВ), имеющие магнитосферную природу. Следует отметить идентичность одновременных измерений в 1996–1997 гг. на IMP-8 и на SOHO, где возрастания, связанные с магнитосферой, отсутствуют. Возрастания с 27-дневной периодичностью связаны с существованием в межпланетном пространстве долгоживущих структур магнитного поля (см. ниже).

Важная характеристика потоков исследуемых электронов – их энергетический спектр. Непосредственные измерения электронов вблизи Юпитера на космических аппаратах PIONEER-10 и -11 показали, что показатель дифференциального спектра юпитерианских электронов в области энергий 0.12–8.0 МэВ в степенном представлении имеет значение $\gamma = 1.5–2$ [6], в то время как электроны магнитосферного и солнечного происхождения имеют существенно более мягкий спектр. Для периодов до полета SOHO, по данным спутника IMP-8, выделение электронов юпитерианского источника проводилось по крутизне спектра. Показатель спектра γ может быть оценен по отношению потоков электронов в различных энергетических каналах. Для анализа использованы каналы (e_2) и (e_3) прибора CRNC на IMP-8: e_2 (0.7–2 МэВ) и e_3 (2–12 МэВ).

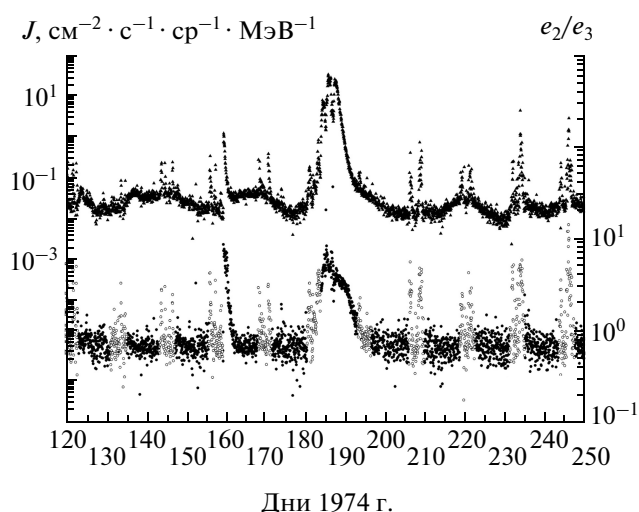


Рис. 2. Верхняя кривая – временной профиль электронов в канале e_2 (темные треугольники) в 1974 г., нижняя – отношение потоков электронов в каналах e_2 и e_3 . В графике отношения каналов e_2/e_3 произведено разделение временных интервалов: время нахождения IMP-8 в межпланетном пространстве дано заполненными кружками, а в хвосте магнитосферы Земли – открытыми.

Для электронов юпитерианского происхождения с $\sim 1.6–1.7$ это отношение $e_2/e_3 = 1.2$, поэтому, как правило, значение $e_2/e_3 < 1.2$ свидетельствует о юпитерианском, а $e_2/e_3 > 1.2$ – о магнитосферном или солнечном источнике частиц. На рис. 2 приведены временной профиль электронов в канале e_2 в 1974 г., а также отношение e_2/e_3 – отношение потоков электронов в каналах e_2 и e_3 . В графике отношения каналов e_2/e_3 проведено разделение временных интервалов: время нахождения IMP-8 в межпланетном пространстве дано заполненными кружками, а в хвосте магнитосферы Земли – открытыми.

Видно, что практически все заходы в магнитосферу сопровождались возрастаниями в канале 0.7–2 МэВ (часто и в канале 2–12 МэВ). При этом в подавляющем большинстве случаев возрастает отношение e_2/e_3 , т.е. спектр смягчается. Отдельные возрастания, которые, по-видимому, связаны с Солнцем, происходят вне магнитосферы.

На графике потоков электронов в канале e_2 (верхняя кривая на рис. 2) хорошо видны возрастания 27-дневной периодичности, связанные, согласно предложенной нами ранее модели [7], с долгоживущими структурами (магнитными ловушками) на Солнце и возникшие благодаря их вращению вместе с Солнцем. Ловушка заполняется электронами при ее прохождении мимо Юпитера, которые затем регистрируются при прохождении ловушки мимо Земли.

На графике отношений e_2/e_3 обращают на себя внимание частые двойные возрастания показате-

ля спектра, относящиеся к времени пребывания IMP-8 в хвосте магнитосферы (например, с 200 по 250 день 1974 г.). Для периодов с двойной структурой возрастания в 1974–76 гг. определено среднее значение суммарного за сутки K_p -индекса, который, как известно, характеризует уровень суббулевой активности. При расчете бралось максимальное значение K_p из трех дней после вхождения спутника в хвост магнитосферы, средние значения для которых составили $K_p = 30$. Аналогичное значение для периодов без возрастаний потоков электронов составило $K_p = 15$, что однозначно указывает на магнитосферное происхождение электронных возрастаний. Ниже приведена предполагаемая схема событий.

Во время активной фазы суббури электроны ускоряются на $L = 7–10$ Re в зоне квазизахвата до энергий 20–300 кэВ. Поток возрастает на несколько порядков за минуты, и ускоренные вблизи полуночи электроны дрейфуют на утреннюю сторону, дополнительно ускоряясь в крупномасштабном электрическом поле конвекции. Так как в области квазизахвата орбиты магнитного дрейфа не замкнуты, частицы попадают на флангах на магнитопаузу, где и рассеиваются. Большая часть их уходит в солнечный ветер, часть попадает обратно в магнитосферу и, возвращаясь магнитным дрейфом в область ускорения, вызывает дополнительное возрастание, так называемый эффект “эхо”. И, наконец, часть частиц, благодаря благоприятному изменению питч-угла, уходит вдоль силовых линий магнитного поля на флангах магнитосферы в хвост, вызывая показанные на рис. 2 возрастания. Поскольку поперечная диффузия не слишком велика, в сердцевину хвоста магнитосферные электроны попадают не всегда. Отметим, что двойные возрастания наблюдаются не только в годы минимума СА, но и в другие спокойные периоды солнечной активности.

ВЫВОДЫ

В хвосте магнитосферы Земли на очень больших расстояниях от Земли (30–40 Re) кроме галактических электронов и электронов от солнечных вспышек хорошо видны

- юпитерианские электроны МэВ-ных энергий, свободно проникающие внутрь хвоста;
- электроны солнечного происхождения, не связанные со вспышками;
- всплески потоков электронов в хвосте магнитосферы и магнитослое, ускоренных в авроральных областях магнитосферы при возмущениях типа суббурь.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-02-00196.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker D.N., Blake J.B., Klebesadel R.W., Higbie P.R. // J. Geophys. Res. A. 1986. V. 91. № 4. P. 4265.
2. Krimigis S.M., Sarris E.T., Armstrong T.P. // Proc 14th ICRC. München. 1975. V. 5. SP 2.2-2.
3. Baker D.N., Higbie P.R., Belian R.D., Hones E.W. // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. P. 531.
4. Baker D.N., Stone E.C. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 4327.
5. Paularena K.I., King J.H. // NASA's IMP-8 Spacecraft, in “Interball in the ISTP Programm” by Sibeck D.G. and Kudela K. (eds.). 1999. P. 145.
6. Teegarden B.J., McDonald F.B., Trainor J.H., Webber W.R., Roelof E.C. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 3615.
7. Дайбог Е.И., Кецкемети К., Логачев Ю.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 554; Daibog E.I., Kecskemety K., Logachev Yu.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 5. P. 618.