

ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПРОТОНЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «АКТИВНЫЙ»

А.Н.Петров

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский Государственный Университет, Россия, Москва, 119992, Воробьевы Горы, НИИЯФ МГУ

Аннотация

В работе представлены результаты исследования потоков низкоэнергичных протонов ($E_p=50-500$ кэВ) в зоне глубоко под радиационными поясами Земли ($L < 1.15$, L – параметр Мак-Илвайна, выражен в радиусах земли). Проанализированы данные эксперимента на борту спутника «АКТИВНЫЙ» (Интеркосмос-24), который функционировал с 1989 по 1993 год на эллиптической (апогей 2500 км, перигей 500 км) орбите. Получено, что результаты эксперимента расходятся с данными ранних экспериментов. Обнаружена зависимость потоков протонов от местного геомагнитного времени (MLT), а именно: в ночные часы (MLT=21^h-00^h-09^h) потоки на порядок больше, чем в дневные часы (09^h-21^h). Это поведение приэкваториальных протонов не согласуется с общепринятой моделью проникновения протонов в приэкваториальную область – процессом двойной перезарядки протонов кольцевого тока.

Введение

Одно из важнейших направлений в физике космического околоземного пространства - изучение потоков заряженных частиц. Область устойчивого захвата в магнитосфере заполнена заряженными частицами, которые играют определяющую роль в вопросах радиационной безопасности космических аппаратов и их экипажа, условиях космической радиосвязи.

Протоны с энергиями от десятков кэВ до сотен МэВ – ГэВ и электроны с энергиями от десятков кэВ до десятков МэВ - основное население радиационных поясов. Для предсказания потоков частиц в настоящее время используются модели НАСА AP8 и AE8, соответственно, для протонов и электронов, в модификациях, учитывающих солнечную активность – MAX и MIN для - максимума и минимума цикла соответственно. Модели созданы на основе экспериментальных данных, полученных, в экспериментах на спутниках за период до конца 70-х годов. Модель AP8 работает для протонов с энергией от 100 кэВ до 400 МэВ только в области $L > 1,15$.

На рис. 1 представлена зависимость потоков протонов от параметра Мак – Илвайна (L), построенная по модели AP8MAX для различных энергий протонов от 10 кэВ до 50 МэВ. Эта модель хорошо согласуется с экспериментом в области радиационного пояса. Однако, при детальном рассмотрении предсказаний модели под радиационным поясом в приэкваториальной области (области малых значений L) с экспериментальными данными (например, по [1, 3, 4]) обнаруживается, что даже в области $L < 2$ существуют значительные расхождения между предсказанными моделью и экспериментально измеренными потоками протонов. Область повышенных потоков протонов вблизи экватора была впервые обнаружена в 1969-1970 годах (работы [8, 10, 11, 12]).

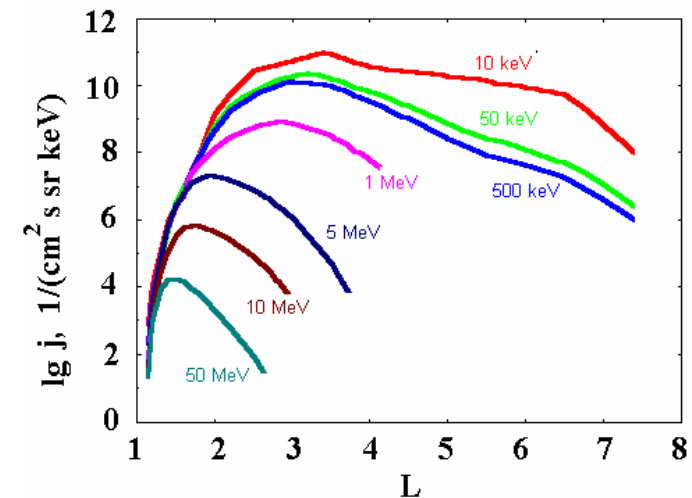


Рис. 1. Распределение потоков протонов с энергиями от 10 кэВ до 50 МэВ в плоскости экватора по модели AP8MAX (см. [4]).

Таким образом, представляется необходимым исследование описанного явления, его детальное описание с целью создания модели, способной предсказывать потоки протонов, а также поиск источников частиц в этой области. Уточнение знаний об источниках позволит расширить наши знания о процессах, происходящих в магнитосфере. Подобные исследования проводились в работах [2, 5, 6].

Описание эксперимента

В настоящей работе представлен результат анализа экспериментальных данных, полученных прибором SPE-1 на борту спутника АКТИВНЫЙ (ИСЗ "Интеркосмос-24"), который функционировал с конца 1989 года до начала 1993. Обработывались данные, в основном, за 1990 год, что составляет ~2300 витков вокруг Земли. Наклонение спутника составляло 81,3°, апогей – 2500 км, перигей – 500 км. Полный цикл прохода через все области местного геомагнитного времени вблизи экватора составлял ~115 суток. Ориентация спутника была стабилизирована, вариации были гладкими и составляли менее 15° (см. [9]).

В прибор SPE-1, размещенный на спутнике входил ряд детекторов, регистрировавших протоны. Регистрация протонов проводилась 3-мя полупроводниковыми детекторами толщиной 100 мкм, диаметром 8 мм, с геометрическим фактором 0,03 см²·ср. Угол приема детектора составлял 20°. Детектор протонов имел встроенный магнитный фильтр, который отклонял электроны с энергией менее 650 кэВ. Три детектора в целом покрывали энергетический промежуток от 25 до 800 кэВ. В каждом он делился на 7 каналов, которые были распределены по энергиям в соотношении, близком к логарифмическому. Для анализа, были выбраны показания одного из детекторов, имеющего энергетические пороги, указанные в табл. 1:

Таблица 1. Пороги полупроводникового детектора в эксперименте

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Е, кэВ	55,2	63,9	78,6	103,0	144,0	213,0	330,0	564,0

Анализ экспериментальных данных

Как было отмечено во введении, возможны несколько источников приэкваториальных протонов, причем существует предел по энергии частиц, который различает частицы по источнику их происхождения. По данным [10, 11], этот предел составляет ~100 кэВ, причем в поведении этих двух сортов частиц отмечается различие. Для исследования этого возможного различия были взяты каналы 55,2 - 103 кэВ и 103 - 564 кэВ детектора протонов прибора SPE-1 на борту спутника АКТИВНЫЙ.

На рис. 2 показана зависимость потоков приэкваториальных протонов от местного времени для высокоэнергичных ($E > 100$ кэВ, правая окружность) и низкоэнергичных ($E < 100$ кэВ, левая окружность) частиц. Каждый круг разделен на 7 колец различного радиуса, которые соответствуют разным L-оболочкам. Номера этих L-оболочек обозначены в правом верхнем углу рисунка и равны 0,99-1,02, 1,02-1,04, 1,04-1,06, 1,06-1,08, 1,08-1,10, 1,10-1,12, 1,12-1,15. Средний поток протонов в единицах $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ})^{-1}$ в каждой точке по L и MLT показан цветом. Соответствие цвета и потока приведена в правом нижнем углу рисунка.

Из рис. 2 видно, что зависимость потоков протонов от местного времени очень сильная. О подобной зависимости уже сообщалось в

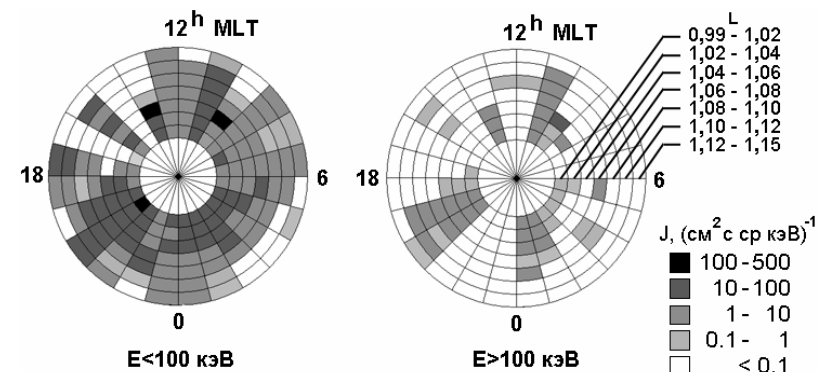


Рис. 2. Зависимость усредненного потока приэкваториальных протонов от местного геомагнитного времени на разных L-оболочках для разных энергий (см. [5]).

работе [7]. Выводы, следующие из рис. 2 о зависимости потоков протонов от местного времени, номера L-оболочки и энергии представлены ниже:

- протоны регистрируются, в основном, в вечерние и ночные часы, в распределении потоков протонов от местного времени есть резкий пик на 10^h-11^h MLT в широком диапазоне по L;
- потоки протонов высоких энергий на 11^h-19^h MLT и 02^h-10^h значительно меньше, чем в другие часы. Низкоэнергичные протоны не регистрируются в интервале 13^h-17^h MLT за исключением области 15^h-16^h MLT; потоки протонов в интервале 19^h-21^h MLT регистрируются в более широком диапазоне L, чем в другие ночные и дневные часы.

Обсуждение результатов и выводы

Основным механизмом, ответственным за появление низкоэнергичных протонов в области вблизи геомагнитного экватора, в настоящее время считается механизм двойной перезарядки.

Процесс перезарядки представляет собой двухступенчатый процесс, в котором в начале энергичные протоны внешнего радиационного пояса сталкиваются с нейтральными атомами водорода экзосферы в реакции:

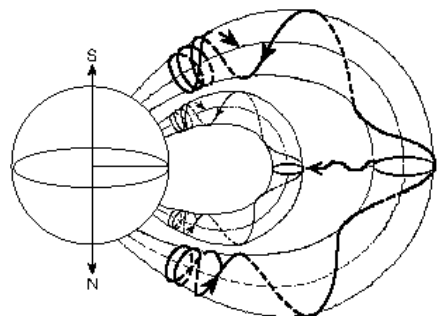
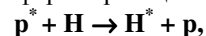
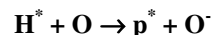


Рис 3. Схема процесса двойной перезарядки [12].

где звездочкой отмечены энергичные частицы. При таком процессе образуется поток энергичных атомов нейтрального водорода, который свободно распространяется в магнитном поле Земли. В плотных слоях атмосферы, атом нейтрального водорода может провзаимодействовать с атомами кислорода -

одной из основных составляющих атмосферы:



Образовавшийся энергичный протон захватывается магнитным полем Земли (см. рис.3).

Эта модель приводит к двум выводам. Во-первых, к независимости потока от высоты. Во-вторых, это приводит к особой геометрии источника, определяемой распределением протонов в радиационном поясе. Это приводит к анизотропии углового распределения с максимумом вблизи 90° у экватора.

Перезарядка не изменяет других характеристик частицы кроме заряда, то есть распределение источника водорода в точке образования можно считать таким же, как и наблюдаемое распределение протонов, а величина потока определяется сечением процесса перезарядки.

Таким образом, наличие сильной зависимости потоков приэкваториальных протонов от местного времени противоречит гипотезе [12] о том, что основным источником приэкваториальных протонов служит кольцевой ток и радиационный пояс Земли.

Литература

1. Бутенко В.Д., О.Р. Григорян, С.Н. Кузнецов, Г.С. Малкиэль, В.Г. Столповский, Потоки протонов с $E_p > 70$ кэВ в приэкваториальной области на малых высотах, Космич. исслед., т 13 вып 4, 1975.
2. Петров А.Н., Спектральные характеристики приэкваториальных ($L < 1,15$) протонов на разных высотах, тезисы Международной Конференции Студентов и Аспирантов по Фундаментальным Наукам "Ломоносов-2002", стр. 226-228.
3. Biryukov A.S., O.R.Grigoryan, S.N.Kuznetsov, A.V.Ryaboshapka, and S.B.Ryabukha, Low-energy charged particles at near equatorial latitudes according to MIR orbital station data. Adv.Space Res., 10, 10189 (1996).
4. Fung S.F., Recent development in the NASA trapped radiation models, Space physics data facility, Code 632, NASA Goddard space flight center, Greenbelt, Maryland, American Geophysical Union, 1996.
5. Grigoryan O., A. Petrov, K. Kudela: Near-equatorial protons: the local time dependence, WDS'02 Proceedings of Contribution Papers: Part II - Physics of Plasmas and Ionized Media, ed. by J. Safrankova, Praha, Matfyspress, p. 263-268, 2002.
6. Grachev E., O. Grigoryan, J. Juchniewicz, S. Klimov, K. Kudela, A. Petrov, J. Stetiarova, Low energy protons on $L \leq 1,15$ in 500 - 1500 km range, Adv. Space Res, vol 30, No 7, 2002.
7. Greenspan M.E., G.M. Mason, and J.E. Mazur, Low-altitude equatorial ions: A new look with SAMPEX, J. Geophys. Res., 104, 19,911, 1999.
8. Hovestadt D., B. Hausler, and M. Sholer, Observation of energetic particles at very low altitudes near the geomagnetic equator, Phys. Rev. Lett., 28, 1340, 1972.
9. Kudela K., J.Matisin. Inner zone electron peaks observed by the "Active" satellite. Journal of Geoph. Res., vol.97, No.A6, pp 8681-8683, June 1, 1992
10. Mizera P.F., and J.B. Blake, Observations of ring current protons at low altitudes, J. Geophys. Res., 78, 1058, 1973.
11. Miah M.A., Observation of low energy particle precipitation at low altitude in the equatorial zone, Journal of Atm. and Terr. Phys., vol 51, No 6, pp 541-549, 1989.
12. Moritz J., Energetic protons at low equatorial altitudes: A newly discovered radiation belt phenomenon and it's explanation, Z. Geophys., 38, 701, 1972.