

УДК 550.388.2

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКОВ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ ПРОТОНОВ ЭНЕРГИИ В ДЕСЯТКИ кэВ – НЕСКОЛЬКО МэВ В ОБЛАСТИ ПОД РАДИАЦИОННЫМ ПОЯСОМ ЗЕМЛИ

О.Р. Григорян, Н.В. Кузнецов, А.Н. Петров

EMPIRICAL MODEL OF FLUXES OF QUASI-TRAPPED TENS keV – FEW MeV PROTONS BELOW THE EARTH'S RADIATION BELT

O.R. Grigoryan, N.V. Kuznetsov, A.N. Petrov

Исследуются возрастания потока протонов с энергией от десятков кэВ до ~1 МэВ, которые наблюдаются на высотах до ~1000 км в области геомагнитного экватора ($L < 1.15$). Общепринято, что основной источник этих протонов – кольцевой ток и радиационный пояс, а механизм переноса их на малые высоты – двойная перезарядка на нейтральных газах верхней атмосферы. По данным нескольких аппаратов («Интеркосмос-24», ОК «Мир», NOAA POES, SAMPEX и др.) получен энергетический спектр, его аппроксимация каппа-функцией, распределение потоков в координатах L, B . Построена эмпирическая модель потоков, дополняющая модель AP8 в области малых L и энергий до 100 кэВ. Модель реализована в виде пакета программ, интегрирована в систему COSRAD и доступна в сети Интернет (<http://cosrad.sinp.msu.ru>). Модель может быть использована для уточнения дозовой нагрузки, которую испытывают низкоорбитальные космические аппараты в приэкваториальных широтах.

Введение

С 1969 г. спутниковые эксперименты показывают, что в области вблизи геомагнитного экватора ($L \lesssim 1.15$) на высотах до ~1000 км постоянно наблюдаются возрастания потока протонов с энергиями от десятков кэВ до нескольких МэВ. Их появление объяснялось переносом на малые L протонов радиационного пояса и кольцевого тока ($L \sim 3-6$) в процессе двойной перезарядки протонов на нейтральных атомах водорода [1–3].

В более поздних работах [4–10] был получен ряд данных, которые не объясняются этой моделью. Кроме того, до сих пор отсутствовала численная модель, позволяющая рассчитывать потоки протонов в приэкваториальной области.

Описание экспериментов

Параметры орбиты, время проведения эксперимента, тип детектора (ППД – полупроводниковый детектор) и энергия регистрируемых протонов представлены в табл. 1.

Исходные данные для модели. Модель LEP

Обобщенный спектр протонов в приэкваториальной области по данным нескольких экспериментов показан на рис. 1. В низкоэнергичной части спектра видно различие спектров, зарегистрированных во время (D) и в отсутствие (Q) геомагнитных возмущений. В целом, по данным большинства экспериментов, спектр при энергии выше 100 кэВ имеет степенной вид, а при меньших энергиях – экспоненциальный.

Для оценки потоков протонов частиц в настоящее время используется модель NASA AP8, созданная на основе экспериментальных данных, полученных в основном на спутниках за период до конца 70-х гг. Эта модель справедлива для протонов с энергией от 100 кэВ до 400 МэВ только в области $L > 1.15$, в области малых L модель нуждается в доработке.

Спектр можно описать одной функцией, которая одинаково хорошо представляет и экспоненциальную пологость спектра в области энергий до 100 кэВ, и степенную особенность при больших энергиях. Спектр протонов в максимуме кольцевого

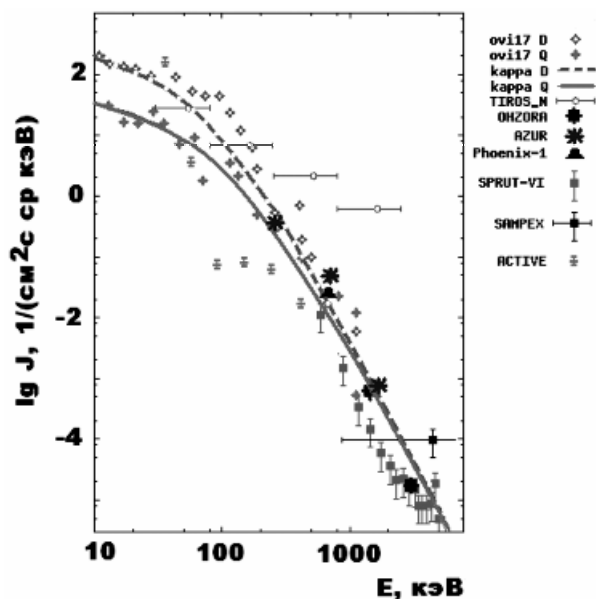


Рис. 1. Энергетический спектр протонов на $L < 1.15$ по данным нескольких экспериментов. Приведена аппроксимация каппа-функцией спектров, зарегистрированных в спокойное время (Q) и во время геомагнитных возмущений (D).

тока имеет те же особенности, что и в приэкваториальной области – степенной хвост и экспоненциальный вид при малых энергиях [12, 13]. Такой функцией является каппа-функция:

$$f(E) = A \left[1 + \frac{E}{kE_0} \right]^{-k-1} \quad (1)$$

Для аппроксимации была выбрана вся совокупность информации о зависимости потока протонов от энергии, полученная в разных экспериментах как в спокойное, так и в возмущенное время.

Питч-угловое распределение протонов, как было установлено ранее, имеет вид «колокольчика», форма которого может быть с достаточно хорошей точностью аппроксимирована функцией вида $f(\alpha) = \sin^n(\alpha)$. Использование этого распределения, вида спектра, а также предположения о том, что поток протонов на экваторе не зависит от высоты [1], была построена

Таблица 1

Космический аппарат	Год	Высота, км	Наклонение, град	Тип детектора	Энергия регистрируемых протонов, E_p
AZUR	1969	384–3145	103	ППД	0.25–1.65 МэВ
OV1-17	1969	398–468	85.5	ППД	12.4–180 кэВ
OV1-19	1969	471–5796	100	ППД	280–560 кэВ
«Космос-378»	1970	240–1770	71	ППД	1 МэВ
«Космос-484»	1972	202–236	81.3	Газоразрядный	70–500 кэВ
Esro-4	1972–1973	245–1175	91	ППД	0.2–1.3 МэВ
TIROS-N	1979	850	98.8	ППД 200 мкм	0.03–2.5 МэВ
S81-1	1982	170–290	85.5	ППД масс-спектрометр	$E > 45$ кэВ. >100 кэВ
OHZORA	1984–1987	320–850	73	ППД телескоп	0.65–35 МэВ
«Активный»	1989–1993	500–2500	81.3	ППД 100 мкм	55–550 кэВ
ОК «Мир»	1991	400	51.6	ППД 300 мкм	0.1–8.0 МэВ
«Коронас-И»	1994	500	83	Сцинтиллятор	>1 МэВ
SAMPEx	1992–1998	520–670	82	ППД времяпролетный масс-спектрометр	>770 кэВ
ОК «Мир»	1999	350	51.6	ППД 200 мкм	0.3–5.0 МэВ

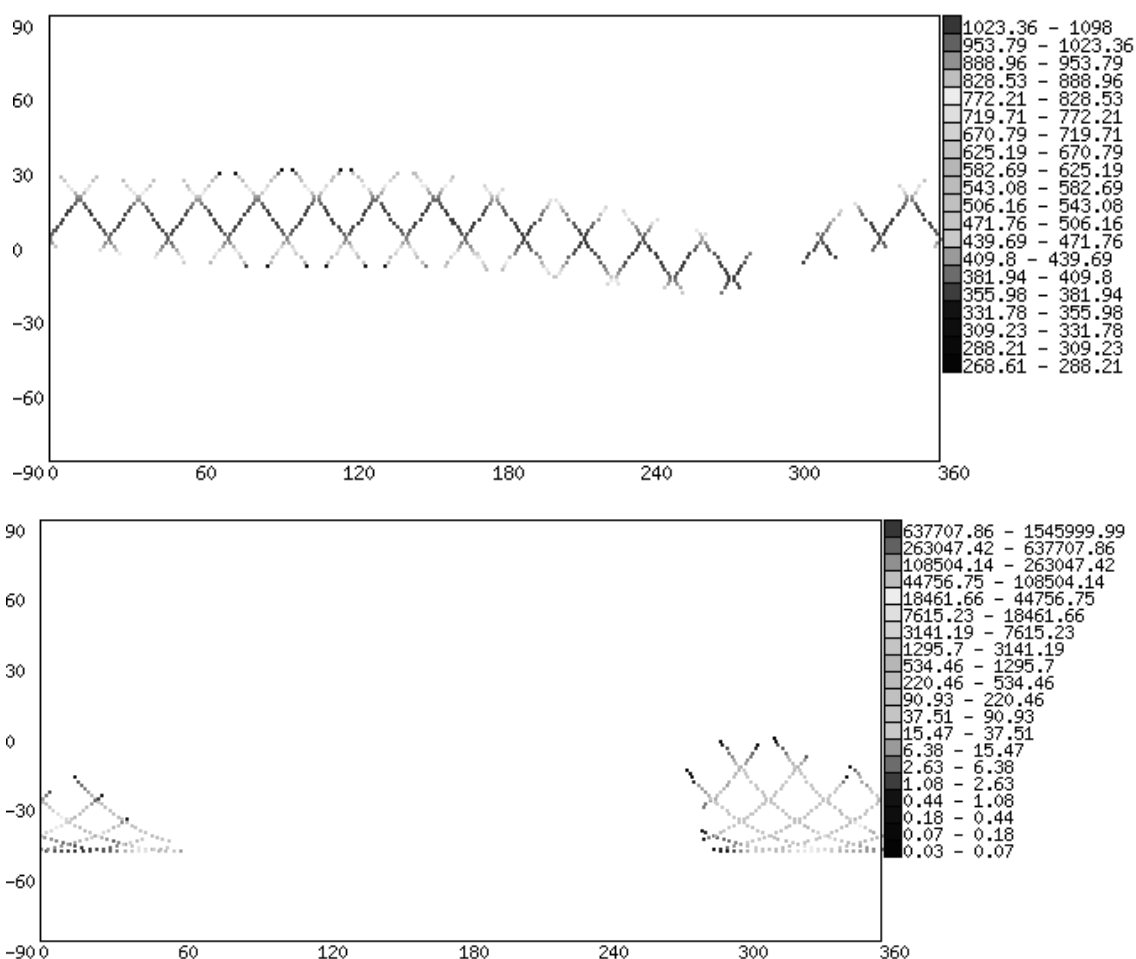


Рис. 2. Географическое распределение потоков протонов с энергией >100 кэВ на высоте 500 км по модели LEP (вверху) и AP8 (внизу).

численная модель потоков протонов LEP, доступная в настоящий момент в составе системы COSRAD на сайте <http://cosrad.sinp.msu.ru/cgi-bin/model/main.pl>. Помимо этого, в состав COSRAD входят модели IGRF для расчета геомагнитного поля и модели NASA AP8, AE8 для расчета потоков протонов и электронов в области Южно-Атлантической аномалии и радиационных поясов.

Исходными данными для модели LEP являются L ,

B/B_0 в точке, где требуется провести расчет потока протонов. Модель работает в области $0.98 < L < 1.15$, $0.1 \text{ Гс} < B < 0.5 \text{ Гс}$ для высот от 200 до 1300 км. Энергия протонов от 10 кэВ до 10 МэВ.

В результате в настоящий момент в системе COSRAD доступны следующие возможности:

- 1) расчет координат орбиты космического аппарата по начальным координатам, наклонению, апогею и перигею;

- 2) расчет магнитного поля, L , B , B/B_0 в каждой точке орбиты по данным модели IGRF;
- 3) расчет потоков протонов в поясе и аномалии по данным L , B/B_0 с помощью модели AP8;
- 4) расчет потоков в приэкваториальной области вне радиационных поясов по данным L , B/B_0 с помощью модели LEP.

Результаты расчетов показаны на рис. 2. Видно хорошее соответствие экспериментальным данным, как в области поясов и аномалии, так и в области под радиационными поясами Земли. Модель может быть использована для уточнения дозовой нагрузки, которую испытывают низкоорбитальные космические аппараты в приэкваториальных широтах.

Выводы

1. Создана база, включающая данные более чем с 10 искусственных спутников Земли.
2. Установлены свойства приэкваториального протонного образования.
3. Создана эмпирическая модель потоков приэкваториальных протонов, доступная в сети Интернет на сайте <http://cosrad.sinp.msu.ru/cgi-bin/model/main.pl>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moritz J. // *Z. Geophys.* 1972. V. 38, N 4. P. 701.
2. Mizera P.F., Blake J.B. // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 1058.

3. Hovestadt D., Hausler B., Sholer M. // *Phys. Rev. Lett.* 1972. V. 28, N 20. P. 1340.
4. Greenspan M.E., Mason G.M., Mazur J.E. // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N A9. P. 19911.
5. Biryukov A.S., Grigoryan O.R., Kuznetsov S.N., et al. // *Adv. Space Res.* 1996. V. 17, N 10. P. 10189.
6. Бутенко В.Д., Григорян О.Р., Кузнецов С.Н. и др. // *Космич. исслед.* 1975. Т. 13, № 4. С. 503.
7. Grachev E., Grigoryan O., Klimov S., et al. // CO-SPAR-ESA Colloquium «Acceleration and Heating in the Magnetosphere». Konstancin Jeziorna, Poland, February 6–10, 2001. P. 31.
8. Grigoryan O., Petrov A., Kudela K. // *WDS'02 Proceedings, Prague, 11–14 June. 2002. Part II.* P. 263.
9. Grachev E., Grigoryan O., Juchniewicz J., et al. // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30, N A7. P. 1841.
10. Петров А.Н. // Тезисы Межд. конф. «Ломоносов-2002», Москва, 9–12 апреля, 2002. С. 226.
11. Gusev A.A., Kohno T., Spjeldvik W.N., et al. // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101, N A9. P. 19659.
12. Ковтюх А.С., Мартыненко Г.Б., Сосновец Э.Н. и др. // *Космич. исслед.* 1995. Т. 33, № 4. С. 350.
13. Ковтюх А.С. // Там же. 2001. Т. 39, № 6. С. 563.
14. Labitzke K., Barnett J.J., Edwards B. // *Handbook MAP 16.* Urbana, 1985.
15. Hedin A. E. // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N A2. P. 1159.

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва