

УДК 550.388.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ПОТОКАМ ЗАХВАЧЕННЫХ ПРОТОНОВ

Н.И. Николаева, Н.В. Кузнецов

### COMPARATIVE ANALYSIS OF MODEL AND EXPERIMENTAL DATA ON TRAPPED PROTON FLUXES

N.I. Nikolaeva, N.V. Kuznetsov

В докладе представлены результаты сравнительного анализа потоков захваченных протонов с энергиями 1–100 МэВ, зарегистрированных на спутниках «Коронас-Ф» (360 км, 83°), «Татьяна» (970 км, 83°), NPOES-15, -17 (850 км, 98°) в 2005 г. А также проведено сравнение этих данных с исходными данными моделей НИИЯФ и NASA (AP8), широко используемыми в практических приложениях.

Results of the comparative analysis of trapped protons with energies 1–100 MeV, observed on Coronas-F (360 km, 83°), Tatiana (970 km, 83°), NPOES-15, -17 (850 km, 98°) in the year 2005 are presented at the report. Comparison of the experimental data with the initial data of models SINP and NASA (AP8) (widely used for practical applications) was made.

К настоящему времени накоплено значительное количество спутниковых данных по потокам заряженных частиц радиационных поясов Земли (РПЗ), которые позволили установить основные особенности их энергетических и пространственных распределений в околоземном космическом пространстве. На основе таких данных разработано несколько количественных эмпирических моделей, позволяющих давать прогнозы радиационных условий, в которых находятся космические аппараты во время своего полета. В настоящее время на практике наиболее широко используются модели NASA (AE8 и AP8) [1, 2] (дополненные в более поздней версии [3]) и НИИЯФ МГУ [4], устанавливающие усредненные потоки захваченных частиц в годы минимума и максимума солнечной активности.

Однако, указанные модели (NASA и НИИЯФ МГУ) имеют ряд принципиальных недостатков, а именно:

- модели являются статическими (устанавливают усредненные потоки частиц только для годов максимума и минимума солнечного цикла),
- модели основаны на устаревших экспериментальных данных, полученных в 60-х и 70-х гг., и, кроме того, построены на данных, полученных во время аномально слабого 20-го цикла солнечной активности;
- модели построены для геомагнитной эпохи конца 60-х начала 70-х гг., а значит, не учитывают вековых вариаций геомагнитного поля Земли.

Указанные недостатки приводят к тому, что многие экспериментально наблюдаемые потоки протонов, измеряемые приборами на спутниках, превышают значения, предсказываемые моделями [5, 6]. Поэтому существующие модели требуют дальнейшего совершенствования на основе данных, которые получены в последние десятилетия.

Однако из-за многообразия факторов, которые могут повлиять на результаты измерений (точность определения геоцентрических и геомагнитных координат спутника, широкий спектр космических излучений с близкими характеристиками), необходимыми требованиями для усовершенствования моделей являются оценка возможных систематических ошибок и сравнительный анализ данных, кото-

рые могут иметь место при регистрации потоков различными детекторами, установленными на различных спутниках. В настоящей работе представлены результаты такого сравнения, выполненного для потоков захваченных протонов, которые были зарегистрированы на двух российских спутниках «Коронас-Ф» (детектор МКЛ) и «Университетский» (детектор «Татьяна»), и двух американских спутниках NOAA-15 и NOAA-17 (детекторы SEM2 [7]). Эти спутники относятся к классу низкоорбитальных полярных космических аппаратов, орбиты которых имеют следующие параметры: «Коронас-Ф» – высота 500 км (360 км в 2005 г.), наклонение 83°4'; «Университетский» – 970 км, 83°; NOAA-15 и -17 – ~810–850 км, 98°.

Существует два важных обстоятельства, затрудняющие анализ экспериментальных данных по потокам захваченных частиц.

Во-первых, наличие в энергетическом спектре значительных потоков захваченных протонов высоких энергий ( $E > 10$  МэВ) заставляет обращать внимание на возможность дополнительного «счета» одиночных полупроводниковых детекторов, который возникает от потока частиц, проникающих через боковую пассивную защиту детекторов, и, следовательно, не учитывается расчетным геометрическим фактором детектора.

Во-вторых, потоки захваченных протонов являются анизотропными из-за направленного движения частиц вдоль силовой линии и наличия пичч-углового распределения частиц в любой точке силовой линии, т. е. при регистрации захваченных протонов требуется обращать внимание на ориентацию оси детектора относительно силовой линии и угла обзора детектора [8, 9].

Рассмотренные выше обстоятельства необходимо принимать во внимание при анализе экспериментальных данных. Примеры показаний различных детекторов, установленных на рассматриваемых спутниках, и их сравнение с модельными расчетами приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 в сравнении с модельными данными представлены экспериментальные потоки протонов на дрейфовой оболочке  $L=1.2$  для трех групп детекторов, энергетические характеристики которых практически

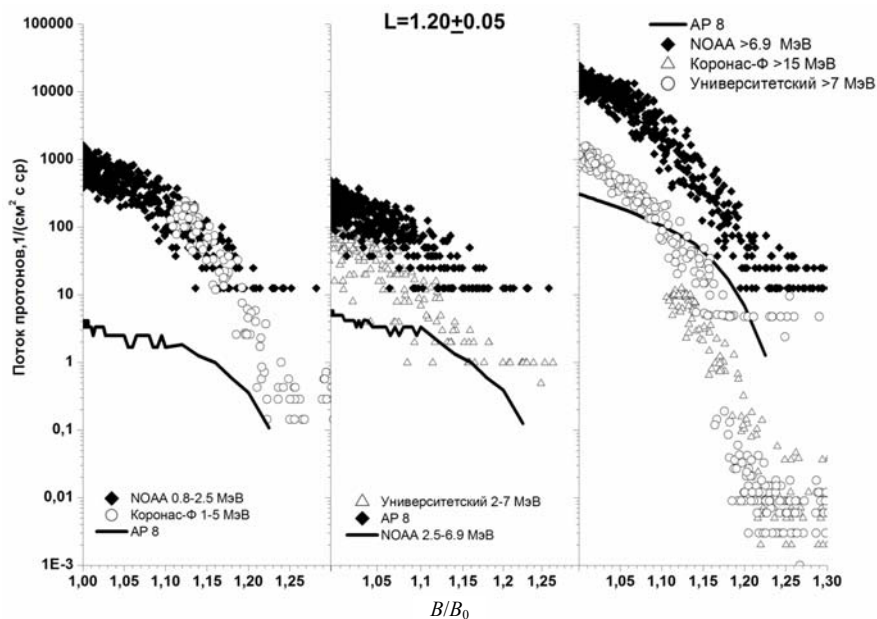


Рис. 1. Зависимости потоков захваченных протонов от отношения  $B/B_0$  на оболочке  $L=1.2$ , зарегистрированные на спутниках NOAA, «Университетский» и «Коронас-Ф» для трех энергетических интервалов (энергия указана в поле рисунка). Кривыми представлены данные модели AP8.

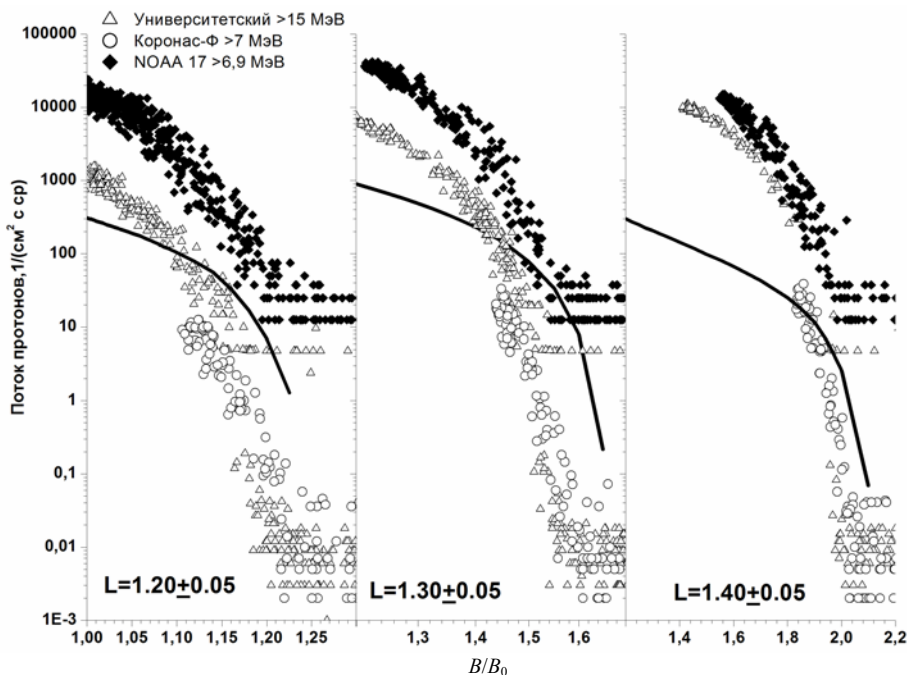


Рис. 2. Зависимости потоков захваченных протонов от отношения  $B/B_0$  на оболочках  $L=1.2, 1.3, 1.4$ , зарегистрированные на спутниках NOAA, «Университетский» и «Коронас-Ф» с энергией  $>14$  МэВ, кривыми представлены модельные зависимости.

совпадают, а сами детекторы в каждой из групп отличаются угловым обзором.

В левом поле рис. 1 представлено сравнение показаний детектора спутника NOAA, являющегося узконаправленным детектором с угловым обзором  $\sim 5^\circ$ , и детектора спутника «Коронас-Ф» (1–5 МэВ), имеющего угловой обзор  $30^\circ$ . Эти показания хорошо совпадают между собой, что позволяет сделать вывод, что на данной дрейфовой оболочке усреднение потока по углу падения частиц в пределах  $30^\circ$  практически не влияет на значение направленного потока, если, как в рассмотренном случае, сущест-

вуют небольшие различия в ориентации оси детекторов относительно силовой линии. Однако этот вывод нельзя сделать, если ориентация детекторов существенно отличается, как это имеет место при сравнении показаний детекторов спутника «Университетский», которые имеют угол обзора  $\sim 30^\circ$ , и показаний детектора спутника NOAA (среднее и правое поле рис. 1).

Также не наблюдается совпадения показаний узконаправленных детекторов спутника NOAA и другого детектора спутника «Коронас-Ф», измеряющего поток протонов с энергиями более 7 МэВ (правое

поле рис. 1). Последний результат можно объяснить тем, что питч-угловое распределение протонов на оболочке  $L=1.20$  более узкое [8], чем угловое поле обзора ( $\sim 60^\circ$ ), которое имеет детектор спутника «Корона-Ф», регистрирующий протоны больших энергий. Этот вывод подтверждает рис. 2, на котором сравниваются показания тех же детекторов (регистрирующих протоны с  $E > 7$  МэВ) на разных  $L$ -оболочках. Как видно из рис. 2, с увеличением высоты оболочки и, следовательно, с уширением питч-углового распределения протонов расхождения в показаниях детекторов с разным углом обзора уменьшаются.

В целом представленные результаты показывают, что потоки захваченных протонов, регистрируемые различными детекторами, не совпадают с модельными данными. И для разработки модели захваченных протонов для низких дрейфовых оболочек важным фактором является учет ориентации и углового поля обзора детекторов, показания которых используются для этих целей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sawyer D.M., Vette F.L. The AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum // National Space Science Data Center/World Data Center A For Rockets and Satellites, NSSDC/WDS-A-R&S 76-06, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, December 1976.
2. Vette F.L. The AE-8 trapped electron environment for solar maximum and solar minimum // National Space Science Data Center/World Data Center A For Rockets and Satellites, NSSDC/WDS-A-R&S 91-24, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, November 1991.
3. Bilitsa D., Models of trapped particle fluxes AE8 (electrons) and AP8 (protons) in inner and outer radiation belts // National Space Science Data Center PT-11B, 1996.
4. Модель космоса-82. Т 3. НИИЯФ МГУ, 1983. 635 с.
5. Armstrong T.W., Colbom B.L. TRAP/SEE Code users manual for predicting trapped radiation environment // NASA, 209879, 2000.
6. Heynderickx D., Review on modeling of the radiation belts // International Journal of modern physics A. 2002. V. 17, N 12, 13. P. 1675–1684.
7. Evans D.S., Greer M.S., Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor - 2: Instrument Descriptions and Archive Data Documentation // Technical Memorandum, Space Environment Center Boulder, Colorado. December, 2000
8. Leonov A., Cyamukungu M., Cabrera F., et al. Pitch angle distribution of trapped energetic protons and helium isotope nuclei along the Resurs-01 No.4 LEO satellite // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 2983–2987.
9. Cabrera F., Cyamukungu M., Stauning P., et al. Fluxes of energetic protons and electrons measured on board the OERSTED satellite // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 2975–2982.

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина, Москва