

УДК 524.1–352

Потоки протонов космических лучей в околоземном пространстве по данным спектрометра PAMELA и моделирования в среде GT

Малахов Виталий Валерьевич

vvmalakhov@mephi.ru

SPIN-код: 3755-5789

Майоров Андрей Георгиевич

agmayorov@mephi.ru

НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Аннотация. Представлены экспериментальные данные эксперимента PAMELA и методика численного моделирования «жизни» заряженных частиц в околоземном пространстве в пакете GT. Описаны возможности комбинации данных этих двух инструментов для построения точной численно-эмпирической модели потоков протонов в околоземном пространстве, что позволит проводить мониторинг радиационной обстановки с высокой точностью.

Ключевые слова: PAMELA, GT, околоземное пространство, радиационные пояса, протоны, захваченное излучение

Введение. Эксперимент PAMELA проводил прецизионные измерения направленных потоков протонов и других частиц космических лучей захваченных в радиационных поясах Земли, а также галактических космических лучей (ГКЛ) на низкой околоземной орбите в течение десяти лет (2006–2016 гг.) [1]. Объем, точность, энергетическое и угловое разрешение, а также энергетический диапазон, в которых были получены экспериментальные данные, а также достоверность выделения отдельных типов частиц значительно превышают подобные характеристики подавляющего числа других приборов, проводящих измерения в радиационных поясах Земли. Полученные экспериментальные данные ограничены высотами от 350 до 600 км, широтами до $\pm 70^\circ$ и энергиями выше 100 МэВ.

Пакет GT разрабатывается на кафедре Экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ МИФИ, и представляет из себя очень гибкий инструмент для моделирования физических процессов в магнитосфере Земли, позволяющий анализировать как отдельные траектории, так и восстанавливать потоки частиц в различных геомагнитных областях околоземного пространства [2, 3].

Методы и материалы. Экспериментальные данные. Полученные данные включают зависимости потоков от номеров дрейфовых оболочек (L), экваториальных питч-углов (α_{eq}), энергии (E) для стабильно- и квази-захваченных протонов и протонов альбеда; временные вариации стабильно-захваченных протонов и протонов ГКЛ в разных фазах цикла солнечной активности [4–10].

Моделирование. Численный пакет GT используется для восстановления как индивидуальных траекторий так и потоков заряженных частиц в магни-

тосфере Земли и моделирования их взаимодействий с атмосферой и ионосферой. Этот инструмент включает в себя современные модели магнитного поля Земли (IGRF, модели Цыганенко и др.), атмосферы (NRLMSISE00) и ионосферы (IRI). Расчеты позволяют заполнить недостающие участки карт потоков, полученные в эксперименте PAMELA.

Заключение. Развитие интегрированной модели на основе данных PAMELA и возможностей пакета GT способно повысить точность мониторинга радиационной обстановки в околоземном пространстве, что важно для расчета дозовой нагрузки на космонавтов и электронику космических аппаратов.

Список источников

- [1] Adriani O. et al. Ten years of PAMELA in space. *Rivista del Nuovo Cimento*, 2017, vol. 40 (10), pp. 473–522. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2017-10140-x>
- [2] Golubkov V.S., Mayorov A.G. Software for Numerical Calculations of Particle Trajectories in the Earth's Magnetosphere and Its Use in Processing PAMELA. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*, 2021, vol. 85 (4), pp. 383–385.
- [3] Galikyan N.H. et al. Cosmic Rays' Evolution in GT Simulation Package. Magnetosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2025, vol. 89 (6), pp. 954–957. <https://doi.org/10.1134/S1062873825711456>
- [4] Golubkov V.S., Mayorov A.G. Experimental Data. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, vol. 85 (4), pp. 383–385. <https://doi.org/10.3103/S1062873821040122>
- [5] Adriani O. et al. Trapped proton fluxes at low Earth orbits measured by the PAMELA experiment. *The Astrophysical Journal*, 2015, vol. 799 (1). <https://doi.org/10.1088/2041-8205/799/1/L4>
- [6] Bruno A. et al. Geomagnetically trapped, albedo and solar energetic particles: trajectory analysis and flux reconstruction with PAMELA. *Advances in Space Research*, 2017, vol. 60 (4), pp. 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.06.042>
- [7] Bruno A., Martucci M., Cafagna F.S., Sparvoli R., Adriani O., Zampa N. et al. East-West Proton Flux Anisotropy Observed with the PAMELA Mission. *The Astrophysical Journal*, 2021, vol. 919 (2), art. no. 114. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1677>
- [8] Bruno A., Martucci M., Cafagna F.S., Sparvoli R., Adriani O., Zharaspayev T.R. et al. Solar-cycle Variations of South Atlantic Anomaly Proton Intensities Measured with the PAMELA Mission. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, vol. 917 (2), art. no. L21. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac1a74>
- [9] Malakhov V. et al. Measurements of the trapped proton and helium fluxes in the PAMELA experiment. *Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference — PoS (ICRC2023)*, Trieste, Italy, Sissa Medialab, 2023, art. no. 117. <https://doi.org/10.22323/1.444.0117>
- [10] Malakhov V.V. et al. Calculation of Geomagnetically Trapped Proton Flux from the PAMELA Experimental Data. *Physics of Atomic Nuclei*, 2023, vol. 86 (6), pp. 1125–1132. <https://doi.org/10.1134/S1063778824010356>