

## ПРЕДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАХВАТА ПРОТОНОВ В РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ЗЕМЛИ

Т. Р. Жараспаев, С. В. Колдашов, В. В. Михайлов

*В ходе спутникового эксперимента ПАМЕЛА, который был запущен в 2006 году на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 (350–600 км, наклонение 70°), проводились измерения потоков заряженных частиц космических лучей на низких околоземных орбитах до начала 2016 года. Полученные в ходе эксперимента данные по потокам высокоэнергетических протонов (0.1–10 ГэВ) в радиационном поясе позволили измерить предельные энергии захвата протонов в разные фазы солнечной активности. Результаты измерений показали, что максимальная энергия захвата протонов на  $L$  оболочках 1.16–1.22 в период как минимума (2009 г.), так и максимума (2014 г.) солнечной активности составила  $\sim 2$  ГэВ.*

**Ключевые слова:** радиационный пояс, захваченные протоны, спутниковый эксперимент.

Изучение потоков протонов, захваченных геомагнитным полем, имеет высокую практическую ценность для определения радиационной обстановки на околоземных спутниковых орбитах. Для описания распределений потоков захваченных частиц в данной работе используется система  $LB$ -координат Мак-Илвейна [1], которая основана на инвариантах движения заряженных частиц в магнитном поле. Для вычисления значений  $L$  и  $B$  использовалась модель магнитного поля Земли IGRF [2]. На данный момент, существуют только теоретические модели, показывающие предельные энергии захвата энергичных протонов для разных дрейфовых  $L$ -оболочек [3], а также отсутствуют экспериментальные данные о протонах высоких энергий больше 1 ГэВ.

Спутниковый эксперимент ПАМЕЛА [4] проводился в период с 2006 по 2016 год на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 на орбите с высотой 350–600 км, с наклонением 70 градусов. Спектрометр ПАМЕЛА состоял из времяпролетной системы,

магнитного спектрометра, системы антисовпадений, электромагнитного калориметра, ливневого детектора и нейтронного детектора. Набор из этих детекторов и параметры орбиты спутника позволили проводить регистрацию потоков частиц разной природы (ГКЛ, магнитосферные частицы, включая радиационный пояс Земли), их идентификацию (протонов, электронов, антипротонов, позитронов, ядер). В ходе эксперимента были накоплены уникальные экспериментальные данные о потоках высокоэнергичных протонов в радиационном поясе в широком энергетическом диапазоне (от нескольких сотен МэВ до десятков ГэВ) за период с конца 23-го солнечного цикла до начала спада активности 24-го. В работе проведен отбор высокоэнергичных протонов во внутреннем радиационном поясе и выполнен анализ полученных данных, который позволил определить предельную энергию захвата протонов во внутреннем радиационном поясе Земли в разные фазы солнечной активности.

Для проведения анализа в данной работе были отобраны протоны с энергиями от 0.08 ГэВ до 70 ГэВ, зарегистрированные на  $L$ -оболочках от 1.01 до 10. Параметры орбиты спутника Ресурс-ДК1 позволяют проводить регистрацию захваченных протонов с питч-углом около 90 градусов только в районе экватора на  $L$ -оболочках 1.01–1.22, в узком интервале величин геомагнитного поля  $B$ .

Таким образом, в тех областях наблюдения, где  $B > 0.23$  Гс, будут регистрироваться только протоны альбедо. На оболочках, где  $L \approx 1.12 - 1.22$  и  $B < 0.21 - 0.23$  Гс – будут зарегистрированы как частицы альбедо, так и захваченные частицы. Далее, при уменьшении величины поля  $B$ , доля захваченных протонов среди зарегистрированных частиц возрастает, но из-за уменьшения экспозиции уменьшается статистическая обеспеченность данных.

Предельной энергией для геомагнитного захвата частицы считается энергия, при которой потоки захваченных ( $B < 0.21 - 0.23$  Гс) и альбедных протонов на выбранных  $L$ -оболочках совпадают в пределах погрешностей. Определение предельных энергий захвата производилось в фазы минимума солнечной активности в 2009 году и максимуме солнечной активности в 2014 году.

Потоки галактических космических лучей (ГКЛ) внутри гелиосферы изменяются циклически в ходе 11-летних циклов в зависимости от уровня солнечной активности из-за взаимодействия с плазмой солнечного ветра и гелиосферными магнитными полями. В ходе эксперимента ПАМЕЛА были получены данные о потоках протонов в период 23-го и 24-го циклов солнечной активности. Количественным показателем солнечной активности является индекс F10.7, описывающий плотность потока радиоизлучения

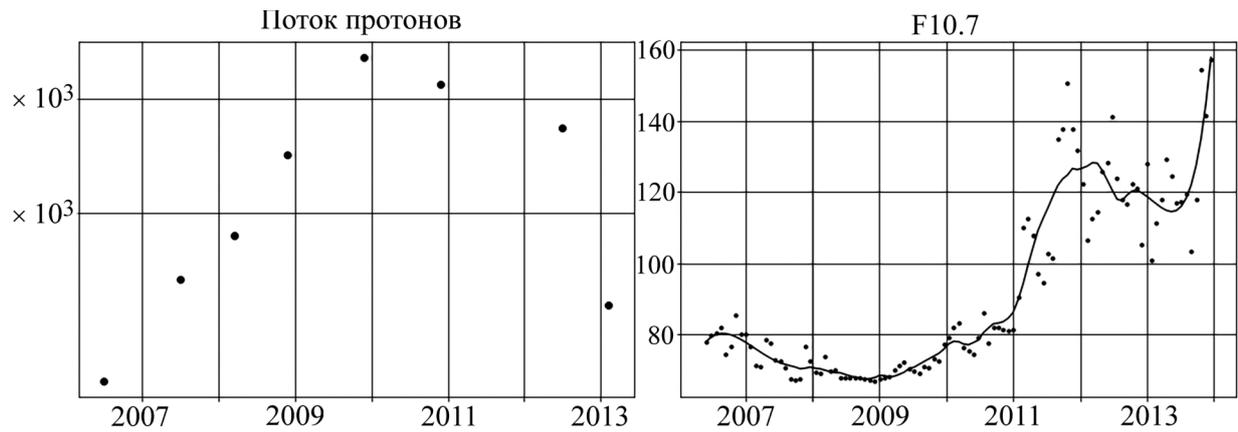


Рис. 1: Поток протонов ГКЛ (слева) и индекс F10.7 (справа).

Солнца на длине волны 10.7 см. На рис. 1 приведены данные эксперимента ПАМЕЛА, по потокам зарегистрированных протонов ГКЛ ( $L \approx 9.0$ ,  $E \approx 0.1$  ГэВ) в сравнении с изменением индекса F10.7 в период с 2006 по 2014 гг. Из рисунка видно, что с уменьшением активности Солнца с некоторым запаздыванием растет поток зарегистрированных протонов ГКЛ, с ростом активности Солнца поток зарегистрированных протонов, наоборот, начинает ослабевать. Наблюдаемое запаздывание согласуется с известными наблюдениями [5].

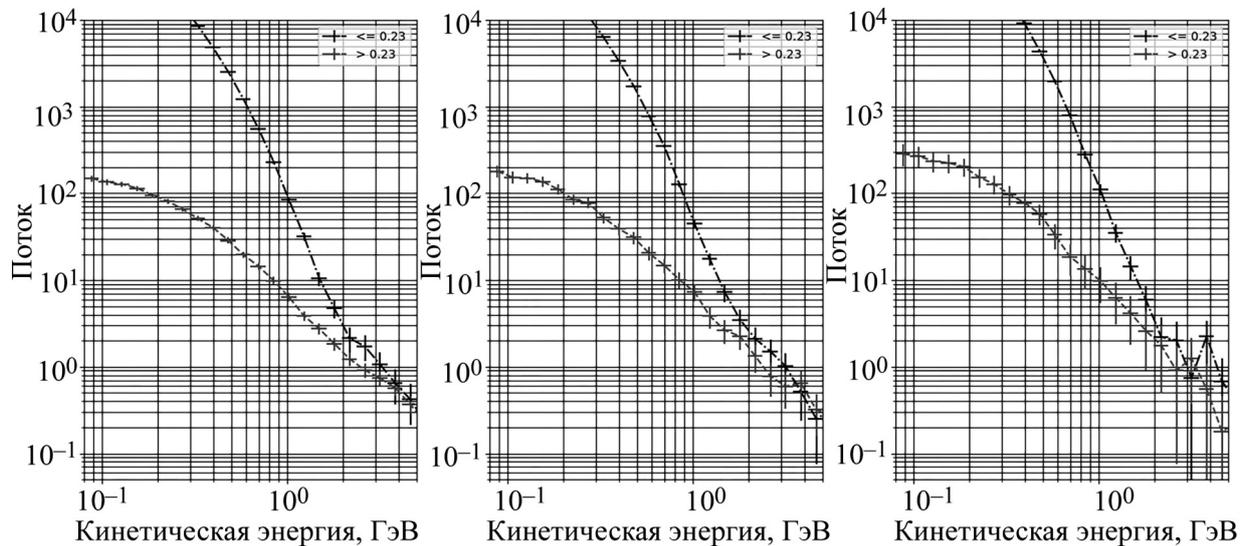


Рис. 2: Поток протонов альбедо (серым) и поток захваченных протонов (черным).

Оценка предельной энергии захвата протонов в радиационном поясе Земли была выполнена для разных фаз цикла солнечной активности на  $L$ -оболочках 1.16–1.22. В

анализ были взяты три момента времени, которые соответствуют периодам: спада солнечной активности в конце 23-го цикла (2006 год), минимум солнечной активности (2009 год), максимум солнечной активности (2014 год). Как видно из графиков на рис. 2, граница энергии захвата не зависит от фазы солнечной активности. Граница энергии захвата, расположенная в точке пересечения графиков потоков альbedo и захваченных протонов, в пределах погрешности соответствует энергии  $E \sim 2$  ГэВ.

Работа была выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.2131.2017/ПЧ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. E. McIlwain, Journal of Geophysical Research **66**(11), 3681 (1961).
- [2] E. Thebault, Earth Planet Sp **67**, 79 (2015).
- [3] R. S. Selesnick, Space Weather **5**(4), S04003 (2007).
- [4] P. Picozza, Astroparticle Physics **27**, 296 (2007).
- [5] R. A. Nymmik, Advances in Space Research **26**(11), 1875 (2000).

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

После доработки 13 ноября 2019 г.

Принята к публикации 14 ноября 2019 г.

*Публикуется по рекомендации VIII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий” (НИЯУ “МИФИ”, Москва, 2019 г.).*