

УДК 523.4-854

ПОЯС ПРОТОНОВ 1–20 МэВ НА $L = 2$

© 2010 г. Л. Л. Лазутин

Научно исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ
lll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 06.04.2009 г.

Удачное расположение спутника *CRRES* во время внезапного начала магнитной бури 24.III.1991 позволило обнаружить эффект инжекции энергичных частиц во внутреннюю магнитосферу [1, 2]. С этих работ можно начать отчет исследованиям захвата мевных протонов солнечного происхождения в протонный пояс Земли, хотя отдельные факты и догадки появлялись и раньше [3]. Высокая вспышечная активность Солнца первых шести лет нового столетия вызвала ряд сильных магнитных бурь, сопровождавшихся приходом к Земле потоков СКЛ. Появилось несколько работ, посвященных анализу измерений и механизмов захвата СКЛ в протонный пояс [4, 5]. Чаще всего максимум захваченных протонов располагался на $L \sim 3$, там же, где он находился и в спокойное время. Однако и на меньших дрейфовых орбитах появлялась возможность захвата, если туда доходила граница проникновения солнечных космических лучей.

Так, после магнитной бури 29–31.X.2003 один из максимумов пояса протонов 1–5 МэВ, самый интенсивный, появился на $L = 2$ и сохранялся там по крайней мере три месяца [6]. Анализ динамики протонов во время нескольких сильных магнитных бурь 2001–2005 гг. [7, 8, 9], показал, что захват СКЛ происходит во время фазы восстановления магнитной бури, причем максимум свежих захваченного протонного пояса может расти в результате переноса к Земле до $L = 2$. В настоящей работе, основанной на результатах анализа динамики протонов во время магнитных бурь в указанных трех работах, используются измерения на трех спутниках для того, чтобы проследить временную историю самого близкого к Земле максимума протонного пояса.

Измерения. На фазе восстановления сильной магнитной бури 29–31.X.2003 измерения на полярном спутнике *КОРОНАС-Ф*, летавшем на высоте 500 км позволили сделать вывод о том, что произошел захват солнечных протонов и образовался новый протонный пояс с двумя максимумами на $L = 2.1$ и 2.8 [7]. Затем после умеренной бури 4.XI.2003 добавился максимум на 3.4, образовалась уникальная структура возмущенного протонного пояса 1–5 МэВ с тремя максимумами. Сильная магнитная буря 20.XI.2003

перевела внешнюю часть пояса в область квазизахвата и выбросила протоны на магнитопаузу. На рис. 1 показан радиальный профиль протонов в канале спектрометра 1–5 МэВ 21.XI.2003. После бури остался лишь максимум на $L = 2$, точнее, на 1.9. Произошел сдвиг в результате радиального переноса протонов во время этой бури. Соответственно, за счет сохранения магнитного момента выросла и интенсивность протонов в поясе примерно в 2 раза.

После ноябрьской бури поток регистрируемых на *КОРОНАС-Ф* протонов стал быстро падать, на три порядка за 30 дней и к концу декабря этот максимум исчез.

В декабре 2003 г. начались измерения на спутнике *SERVIS-1*, тоже полярном с высотой 1000 км [10]. При анализе процесса захвата протонов СКЛ во время магнитной бури 22–27.VII.2004 был замечен и максимум на $L \sim 2$ (рис. 2), при том, что захват про-

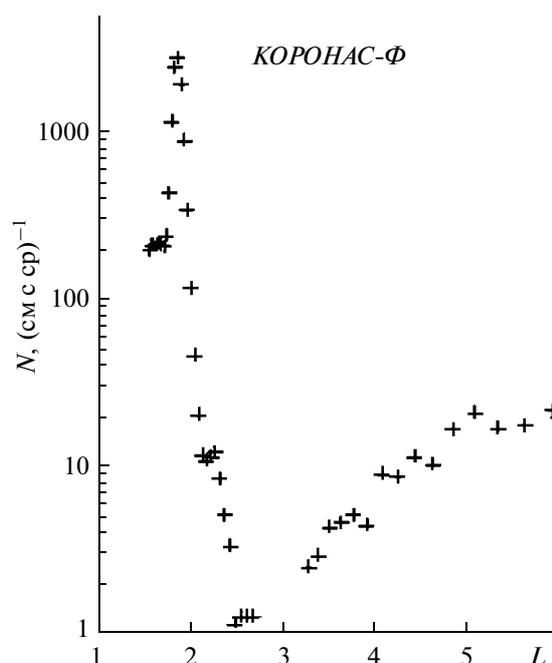


Рис. 1.

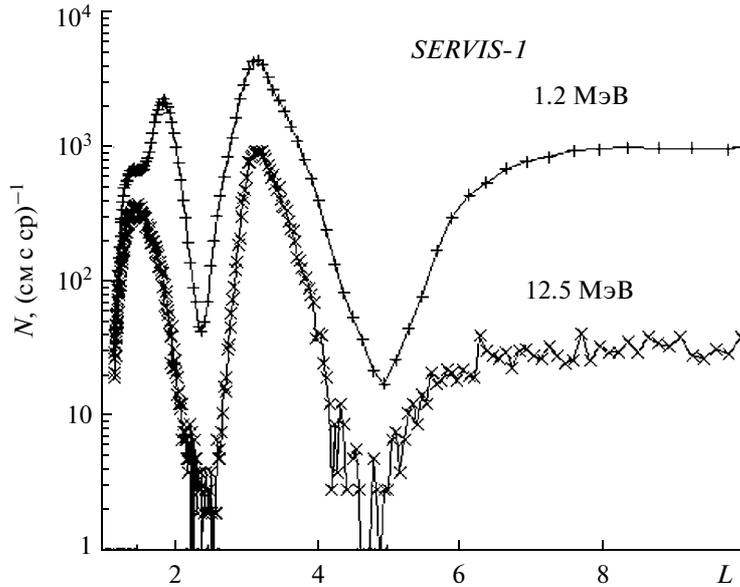


Рис. 2.

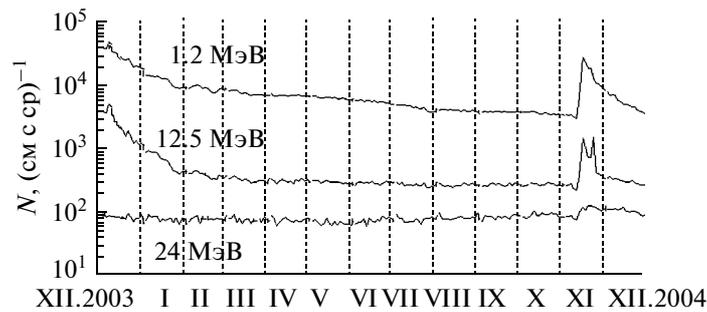


Рис. 3. *SERVIS-1*. Динамика протонного пояса, с декабря 2003 по декабрь 2004 г. Максимальные значения раз в сутки при пролете над Бразильской магнитной аномалией на $L = 2$. $E = 1.2, 12.5, 24$ МэВ.

тонов СКЛ на столь глубокую оболочку во время этой не слишком сильной бури был невозможен. Анализ измерений на двух спутниках показал, что граница проникновения протонов СКЛ в магнитосферу приближалась к Земле только до $L \sim 2.7$, при откате образовался максимум свежих захваченных протонов только на $L = 3.2$ [8], что и видно на рис. 2. Отметим, что и в этой, и в следующей буре захват СКЛ наблюдался и в канале 12.5 МэВ, но его не было в канале 24 МэВ. Это позволяет нам ограничить верхний диапазон энергий захваченных протонов примерно на уровне 20 МэВ. Третий максимум на $L = 1.5$ на рис. 2 совпадает с положением протонного пояса энергичных протонов ($E > 30\text{--}50$ МэВ) и в канале 1 МэВ могут быть присчеты от этих протонов.

Чтобы выяснить, когда появился максимум на $L = 2$, мы проследили за изменением интенсивности протонов в каналах 1.2, 12.5 и 24 МэВ на $L = 2$ с начала работы спутника *SERVIS-1* (рис. 3). Видно,

что полный спад потока, измеренный на спутнике *КОРОНАС-Ф*, на большей высоте не наблюдается. Выясняется, что пояс $L = 2$ не исчез, а сохранялся с достаточно высокой интенсивностью до июля, и далее до ноября 2004 г. Очевидно быстрый спад интенсивность относился только к питч-углам вблизи конуса потерь. Кроме того, измерения на *SERVIS-1* показали, что диапазон энергий захваченных протонов СКЛ выше, чем мы предполагали. Хотя при анализе измерений на *КОРОНАС-Ф* во время октябрьской бури и отмечался факт захвата альфа-частиц и протонов больших энергий, был сделан неверный вывод о том что существенного захвата протонов с энергией выше 1–5 МэВ нет, так как отчетливого максимума в канале 12–26 МэВ не было видно.

Интенсивность в канале 12.5 МэВ на $L = 2$ падает на порядок за 2 месяца и потом она стабилизируется, однако трудно выделить существование максимума

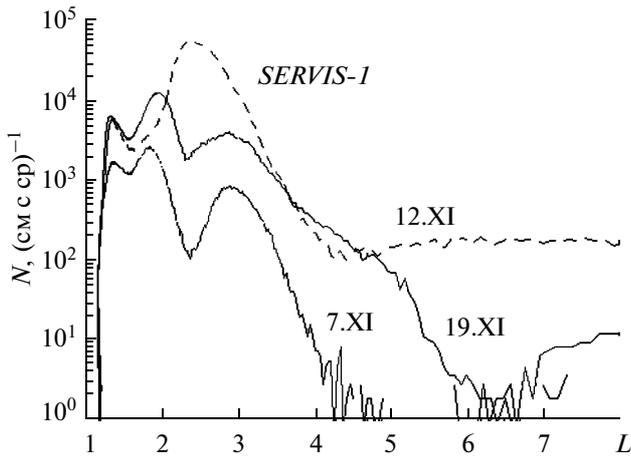


Рис. 4. Изменение радиального профиля протонов в канале 1.2 МэВ по измерениям на спутнике *SERVIS-1*, 7, 12 и 19.XI.2004.

на склоне внутреннего пояса (рис. 2). В канале 26 МэВ захват не наблюдался.

Как видно из рис. 3, интенсивность протонов в каналах 1.2 и 12.5 МэВ возрастает вновь в ноябре 2004 года. 7–11.XI.2004 наблюдалась двойная магнитная буря, изменившая радиальный профиль протонов за счет захвата и ускорения этих захваченных солнечных протонов СКЛ. Подробно этот случай разбирается в работе [9]. На рис. 4 приведены три радиальных профиля протонов. В профиле 7.XI.2004, до начала бури, видны два максимума, на $L = 2$ и $L = 3$, те же, что и после магнитной бури в июле (рис. 2), сохранившие повышенную интенсивность. Заметим, что интенсивность внешнего максимума уменьшилась в 5–6 раз, тогда как интересующий нас пояс $L = 2$ практически не потерял захваченных частиц. Во время фазы восстановления первой бури происходит захват протонов СКЛ на $L = 2.8$ и затем радиальный перенос с ускорением.

Второй профиль на этом рисунке, 12.XI.2004, демонстрирует промежуточный результат этого процесса, максимум уже сдвинут на $L = 2.4$ и на $L = 2$ поток свежееускоренных и свежезахваченных частиц уже превышает добуревой уровень. Дальнейший рост интенсивности по-видимому приводит к раскату ионно-циклотронной неустойчивости и происходит быстрый спад интенсивности, причем дифференцировано по дрейфовым оболочкам. В результате на третьем радиальном профиле мы видим, как единый протонный пояс разбивается на два, с максимумом опять-таки на $L = 2$ и 3.

Спектрометр спутника *SERVIS-1* с мая 2005 года работает неустойчиво, *КОРОНАС-Ф* уже давно не видит максимума на $L = 2$, но к этому времени был запущен спутник *УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-ТАТЬЯНА* [11]. На рис. 5 показаны радиальные профили в канале >1 МэВ и для сравнения >40 МэВ, измеренные 4.XII.2006, через год после описанных выше измерений. Здесь мы наблюдаем три максимума: в канале >1 МэВ на $L = 1.8, 3$ и 4.5. Последний максимум слишком хорошо совпадает с положением внешнего электронного пояса, и здесь явно напрашивается вывод о присчете энергичных электронов. Максимум на $L = 3$ соответствует основному максимуму протонного пояса с энергией 1 МэВ, а интересующий нас максимум на $L = 1.8$ свидетельствует о его многолетней (трехлетней по крайней мере) устойчивости. Можно подозревать и здесь определенный присчет, создаваемый энергичными протонами, однако соотношение темпов счета в каналах >50 МэВ и >1 МэВ на $L = 1.5$ и $L = 1.8$ свидетельствует о том, что в этом максимуме вклад мэвных протонов превалирует. В работе [12] при оценке степени участия солнечных протонов в создании протонного пояса на разных ветвях 11-летнего цикла солнечной активности мы исходили из предположения, что протонный пояс СКЛ сохраняется в возмущенном состоянии в течение года. Как видно из результатов данной рабо-

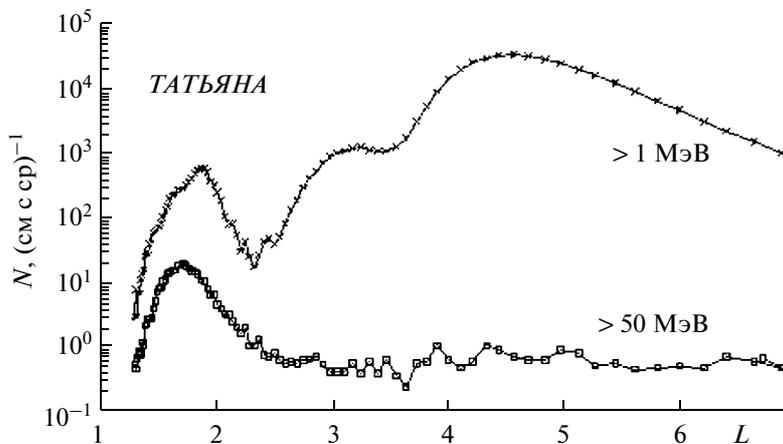


Рис. 5. *УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-ТАТЬЯНА*. Радиальные профили протонов $E > 1$ и $E > 50$ МэВ 4.XII.2006.

ты, для пояса с максимумом на $L = 2$ этот срок может быть увеличен по крайней мере в три раза.

ВЫВОДЫ

Классическая теория образования протонного пояса [13] объясняет положение максимумов протонов разных энергий конкуренцией процесса радиальной диффузии из авроральной зоны и потерь на ионизацию. Предсказания теории для протонов 1 МэВ совпадают с измерениями: максимум расположен на $L = 3$. Заброс протонов СКЛ на $L = 2.5-3$ во время сильных магнитных бурь резко приближает стартовую позицию радиальной диффузии или переноса, и образование пояса на $L \sim 2$ становится возможным. Потери частиц на этой глубине за счет волновой активности ничтожны, но и потери на ионизацию остаточной атмосферы определяют достаточно большое (годы) время жизни такого пояса.

Рассмотренные выше измерения радиального профиля протонов 1–20 МэВ на трех низковысотных полярных спутниках показали, что:

1. Образовавшийся в результате захвата солнечных протонов 1 МэВ на фазе восстановления сильной магнитной бури 29–31.X.2003 пояс с максимумом в районе $L = 2$ существовал не менее трех лет.

2. Максимум пояса смещался к Земле от $L = 2.1$ до $L = 1.7$ во время магнитных бурь.

3. Один раз за эти три года, во время бури 7–11.XI.2004, наблюдалось пополнение пояса солнечными протонами.

4. Пояс протонов 12.5 МэВ распадается быстрее, но и он держался на возмущенном уровне более полугода.

5. Протонного пояса 1–20 МэВ на $L = 2$ в стандарте AP8 нет, вероятно следует стандарт скорректировать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blake J.B., Kolasinski W.A., Fillius R.W. and Mullen E.G.* Injection of electrons and protons with energies of tens of MeV into $L > 4$ on 24 March 1991 // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 821.
2. *Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А.* Вариации энергичных частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24–26 марта 1991 года // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1993. Т. 33. № 6. С. 41–45.
3. *Mineev Yu.V., Spirkova E.S., Glukhov G.A., Kratenko Yu.P.* Features of solar cosmic ray penetration into the high-latitude regions of the Earth's magnetosphere inferred from Intercosmos-19 data // *Proc. of 18-th Intern. Cosmic Ray Conf. Bangalore, India.* 1983. V. 3. P. 262–265.
4. *Lorentzen K.R., Mazur J.E., Loper M.E. et al.* Multisatellite observations of MeV ion injections during storms // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1231.
5. *Slocum P.L., Lorentzen K.R., Blake J.B. et al.* Observations of ion injections during large solar particle events // *AGU Fall Meeting.* 2002. SH61A-0501.
6. *Lazutin L.L., Kuznetsov S.N. and Podorolsky A.N.* Solar proton belts in the inner magnetosphere during magnetic storms // *Proceedings of the 2d International Symposium Solar Extreme Events: Fundamental Science and Applied Aspects, Nor-Amberd, Armenia, 26–30 September 2005 / Ed. by A. Chilingarian and G. Karapetyan, CRD, Alikhanyan Physics Institute, Yerevan.* 2006. P. 63–67.
7. *Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н.* Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2007. Т. 47. № 2. С. 187–197.
8. *Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Panasyuk M.I. et al.* Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23–27, 2004 // *Advances in Space Research.* 2009. V. 43. P. 553–558.
9. *Лазутин Л.Л., Гоцелюк Ю.В., Муравьева Е.Н. и др.* Динамика солнечных протонов в магнитосфере Земли во время магнитных бурь в ноябре 2004–январе 2005 // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2010. № 1.
10. *Kodaira S., Asaeda M., Fujii M. et al.* Space and Time Correlations of Particle Fluxes after Giant Flares in Radiation Belts Observed by Two Satellites, USERS and SERVIS-1 // *Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, Pune 2005.* P. 101–104.
11. *Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю. и др.* Первые результаты исследований космической среды на спутнике Университетский-Татьяна // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 4. С. 291–305. (*Cosmic Research.* P. 291)
12. *Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И.* О вкладе солнечных космических лучей в формирование протонного пояса Земли // *Космич. исслед.* 2009. Т. 47. (*Cosmic Research.* P.)
13. *Тверской Б.А.* Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1965. Т. 5. С. 793–809.