

УДК 523.4-854

О ВКЛАДЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

© 2009 г. Л. Л. Лазутин, Ю. И. Логачев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ

ll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 17.06.2008 г.

Дается оценка значимости вклада солнечных протонов в потоки захваченной радиации во внешнем радиационном поясе Земли ($L > 2$) в различные фазы солнечной активности. В периоды высокой солнечной активности большую часть времени потоки протонов с энергией 1–5 МэВ на $L = 2–3$ имеют источником СКЛ, в периоды минимума солнечной активности потоки захваченных протонов определяются традиционным диффузионным механизмом под действием внезапных импульсов ММП.

PACS: 94.30.Hn, 94.30.Xy, 96.40.Fg

1. ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные магнитные бури в конце прошедшего цикла возродили интерес к проблеме вклада солнечных протонов с энергией 1–20 МэВ в радиационные пояса Земли. При спокойной магнитосфере граница проникновения солнечных протонов с энергией до 100 МэВ ограничена силовыми линиями с $L \approx 5–7$. Во время магнитных бурь граничное значение L уменьшается. Так, для нескольких магнитных бурь граница проникновения СКЛ в магнитосферу составляла всего $L = 2–3$ и после бури внешний протонный пояс оказывался переполненным на 2–3 порядка протонами с энергией 1–20 МэВ. Предлагается два различных механизма, объясняющих процесс захвата СКЛ – инжекция в момент SC [1–4] или переход протонов СКЛ на замкнутые дрейфовые оболочки на фазе восстановления магнитной бури [5, 6]. Обе группы авторов сходятся на том, что вклад СКЛ в протонный пояс может быть весьма существенным, а в некоторые интервалы – определяющим. Таким образом, существующие модели внешнего протонного пояса, основанные на механизме радиального переноса частиц из авроральной магнитосферы во внутреннюю, нуждаются в дополнении, равно как и прикладные модели радиационной обстановки в ближнем космосе.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЯСОВ СКЛ

Сообщения о возможном вкладе СКЛ в протонный пояс появлялись с 70-х годов [2, 7], но сведений, позволяющих оценить длительность существования пояса солнечных протонов в них не было. В ряде публикаций последнего времени появились новые данные. Lorentzen и др., [8] обнаружили случаи захвата в дополнительную ловушку протонов с энергией 2–15 МэВ во время сильных магнитных бурь 1998 и 2000 годов. Солнечное происхождение этих

частиц следует из присутствия ионов гелия. Slocum и др. [9] нашли 11 событий, когда новые радиационные пояса появились во время магнитных бурь и вспышек солнечных космических лучей с 2000 до 2002 г. В этих работах утверждается, что один из таких поясов, который появился 24.XI.2001, наблюдался по крайней мере до июля 2002, а возможно и до октябрьской бури 2003 г. Результаты анализа времени жизни протонов в образованных после сильных бурь 2001–2004 гг. поясах (ниже эти новые пояса протонов от СКЛ будем для краткости называть поясами СКЛ) представлены в работе [10]. Было получено, что сразу после захвата и ускорения протонов наблюдается питч-угловая диффузия в конус потерь, вызванная взаимодействием с ионно-циклотронными волнами.

После 10–15 суток поток протонов становится недостаточным для возбуждения неустойчивости и диффузия переходит в медленный режим, однако повышенный поток протонов остается в течение недель и месяцев, в зависимости от энергии частиц и расстояния от Земли дрейфовой оболочки.

На рис. 1. приведены радиальные профили интенсивности протонов 1–5 МэВ, измеренные на низковысотном спутнике КОРОНАС-Ф перед и после бури 29.X.2003 г. Первый профиль соответствует международному стандарту радиационных поясов, тогда как во втором появился новый максимум на $L = 2$ более чем на порядок превышающий спокойный уровень. Этот пояс СКЛ на $L 1.8–2.2$, образованный 30–31.X.2003, существовал до ноября 2004 г.

Можно предположить, что подобная ситуация имела место и в прошедшие циклы солнечной активности и попытаться оценить вероятность заполнения магнитосферы протонами СКЛ в прошедшие годы. Для этого в настоящей работе мы провели объединенный анализ баз данных по магнитным

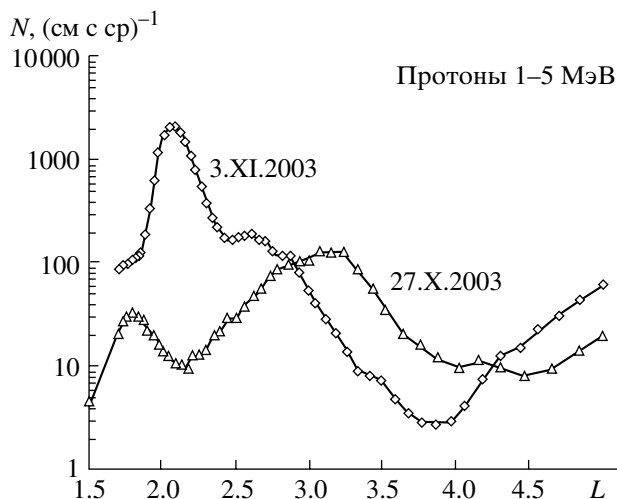


Рис. 1

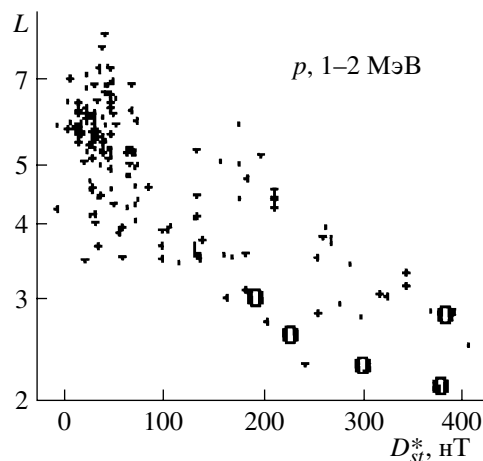


Рис. 2

бурям 1974–2005 гг. и данных о потоках солнечных протонов с энергией 1–15 МэВ, основываясь на характеристиках новых, образовавшихся во время магнитных бурь радиационных поясов от протонов СКЛ, полученных при достаточно подробном анализе событий 2001–2005 гг.

В таблице собраны характеристики сильных магнитных бурь и протонов СКЛ 2001–2005 гг., анализ которых был выполнен в работах [5, 6, 10] по измерениям на полярных низковысотных спутниках *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1*. Из таблицы видно, что в течение всего периода 2001–2005 гг. существовали пояса протонов 1 МэВ солнечного происхождения. Как сообщалось в указанных выше работах, по интенсивности в максимуме они превосходили протонный пояс спокойного периода на 1–2 порядка. В эти годы была лишь одна магнитная буря 20.XI.2003 с $D_{st}^* = 422$ нТ, во время которой не был отмечен захват СКЛ, поскольку поток СКЛ вблизи орбиты Земли, был невелик.

В нескольких случаях наблюдался захват протонов и с энергией 12–15 МэВ, длительность их существования была примерно вдвое меньше.

Измерения на низковысотных спутниках не дают возможности определить величины потока частиц в экваториальной плоскости, однако оценка анизотропии захваченных протонов по питч-углам [11] показывает, что эти величины существенно выше измеренных на низких высотах.

Для образования нового пояса необходимо, чтобы протоны СКЛ свободно проникали на главной фазе магнитной бури достаточно глубоко во внутреннюю магнитосферу. На рис. 2. приведен график зависимости положения границы проникновения (ГП) СКЛ в земную магнитосферу от D_{st}^* из работы [12], на котором добавлены данные о положении максимума пояса СКЛ (кружки) из приведенных в таблице случаев. Несмотря на значительный разброс точек, зависимость положения ГП от мощности кольцевого тока наблюдается отчетливо. Таким образом, индекс D_{st}^* можно использовать для оценки возможности захвата частиц СКЛ в протонный пояс. Хотя захват наблюдался и во время бурь с $D_{st}^* \sim 150$ нТ, мы будем учитывать только магнитные бури с $D_{st}^* \geq 200$ нТ, сопровождаемые потоком протонов СКЛ с энергией

Таблица

Дата	D_{st}^* , нТ	B_z , нТ	J_{\max} СКЛ ($E = 1$ МэВ), ($\text{cm}^2 \text{ с ср}^{-1}$)	T^* , месяцев	L_{\max} пояса СКЛ
7.XI.2001	292		52000	1	2.3
24.XI.2001	221	–40	21000	23	2.5
29–31.X.2003	383	–20	2540	12	2.0, 2.7
24–27.VII.2004	197	–20	870	4	2.8
7.XI.2004	373	–40	290	>4	2.0, 3.0

Здесь и дальше D_{st}^* означает $ID_{st} \min L$.

* Длительность до нового захвата СКЛ.

1 МэВ выше $250 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$. Для оценки длительности существования повышенного потока протонов примем следующие критерии: при $D_{st}^* > 250 \text{ нТ}$ захват возможен до $L = 2-2.5$ с длительностью больше 1 года, при $250 > D_{st}^* > 200 \text{ нТ}$ новый пояс на $L \sim 3$ существует полгода. О захвате и длительности существования протонов 10–20 МэВ и вообще о возможном спектре захваченных частиц мы здесь говорить не будем, данных пока недостаточно.

3. МАГНИТНЫЕ БУРИ И ПОТОКИ СКЛ В 1976–2005 гг.

Для анализа была создана база данных, в которую вошли все магнитные бури с D_{st}^* выше 50 нТ с 1976 по 2005 г. и потоки протонов СКЛ в межпланетном пространстве с энергией 1–2 МэВ в моменты D_{st}^* . Данные по СКЛ отбирались по общедоступным в Интернете измерениям на спутниках *IMP-8* и *ACE*.

На рис. 3 приведен сводный график зависимости потока протонов СКЛ от D_{st}^* по всем магнитным бурям. Видно, что большие потоки СКЛ наблюдаются у орбиты Земли и при слабых и при умеренных магнитных бурях. Однако сильные бури как правило сопровождаются повышенными потоками протонов СКЛ. Для этих событий нет зависимости потока частиц от мощности бури, что, по-видимому, можно объяснить большой разницей времен прихода к Земле потоков СКЛ и ударного фронта СМЕ, вызывающего магнитную бурю. На вторые сутки после начала вспышки СКЛ потоки частиц могут существенно уменьшиться.

На рис. 4 приведены графики распределения во времени с 1976 по 2005 г. магнитных бурь с D_{st}^* выше 150 нТ. Потоки протонов СКЛ с энергией >1 МэВ меньше 200, от 200 до 1000 и больше 1000 $(\text{см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$ показаны разными значками для каждой из этих бурь. Сплошной линией приводится временной ход чисел Вольфа. Период 2001–2005 гг. выделяется как по числу сильных магнитных бурь, так и по интенсивности сопровождающих их потоков солнечных протонов, однако и предшествующие периоды максимума и спада 11-летнего цикла солнечной активности были заполнены сильными бурями сопровождающимися значительными потоками СКЛ, интенсивности которых может быть достаточно для образования нового усиленного протонного пояса СКЛ, если к тому же учесть процесс ускорения на фазе восстановления бури.

На рис. 5 на шкале времени вертикальными линиями отмечены моменты регистрации отобранных событий, а жирными горизонтальными линиями – длительность возможного существования повышен-

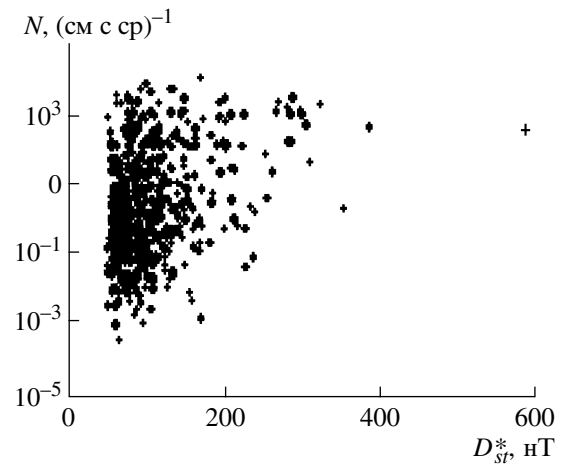


Рис. 3

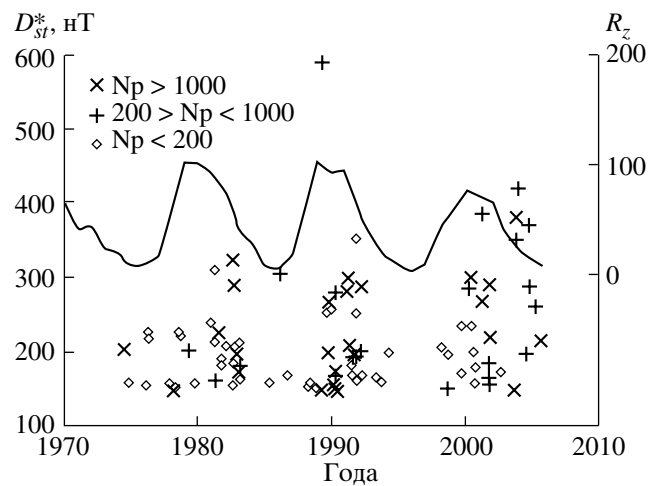


Рис. 4

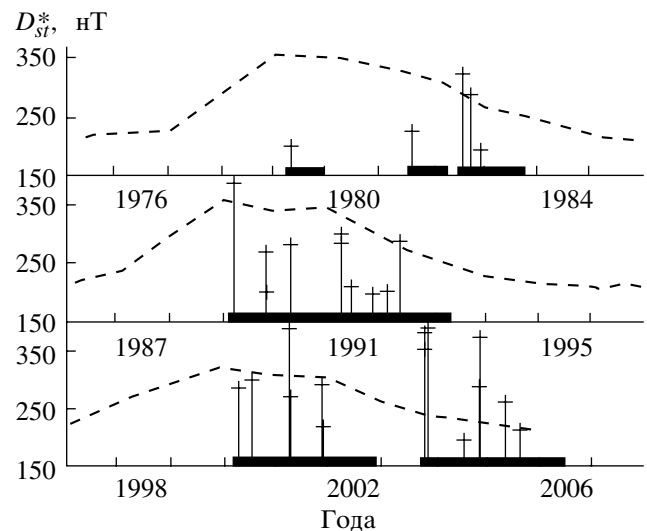


Рис. 5

ной интенсивности поясов СКЛ, в соответствии с указанными выше критериями.

Видно что существуют годы, когда захвата СКЛ скорей всего не было. Это 1975–1978, 1984–1988, 1994–1999, так что в эти периоды протонный пояс скорей всего формируется и поддерживается традиционным механизмом диффузии протонов магнитосферного (суббрегового) происхождения из авральной магнитосферы [13]. Вместе с тем, выделяются периоды, когда велика вероятность захвата СКЛ и внешний протонный пояс вполне имеет право называться поясом солнечных протонов. Это 1979–1983, 1989–1993 и 2000–2005 гг.

Если просуммировать все отмеченные интервалы, то окажется, что периоды существования поясов СКЛ с энергией 1 МэВ за весь рассмотренный период 1974–2005 составит 42% времени, оставшиеся 58% радиальный профиль протонов соответствует стандартному. В годы, близкие к максимуму солнечной активности пояса СКЛ занимают почти 100% времени. Разумеется, наша оценка может отличаться от истины, причем возможны отклонения как в одну, так и в другую сторону. Так, в работе [8] отмечен случай захвата СКЛ во время магнитной бури 4.V.1998 г. не вошедший в наш список. Однако даже такая приблизительная оценка требует коррекции существующих представлений о структуре внешнего протонного пояса и об уровне радиации в периоды максимума и спада солнечной активности.

ВЫВОДЫ

В периоды высокой солнечной активности большую часть времени потоки протонов с энергией $E = 1–10$ МэВ на $L = 2–3$ имеют источником СКЛ, в периоды минимума солнечной активности потоки захваченных протонов определяются традиционным диффузионным механизмом под действием внезапных импульсов ММП.

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. 821–829.
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 аэрономия.* 1993. Т. 33. № 6. С. 41–45.
3. *Hudson M.K., Kotelnikov A.D., Li X., Roth I. et al.* Simulations of proton radiation belt formation during the March 24, 1991 SSC // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 291–295.
4. *Kress B.T., Hudson M.K., Slocum P.* Impulsive solar energetic ion trapping in the magnetosphere during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L06108.
5. *Lazutin L.L., and Kuznetsov S.N.* Study of the solar proton belts in the inner magnetosphere // “Physics of Auroral Phenomena”. Proc. XXIX Annual Seminar. Apatity. 2006. P. 104–107.
6. *Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н.* Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2007. Т. 47. № 2. С. 187–197.
7. *Mineev Yu.V., Spirikova 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.
8. *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. 1231–1239.
9. *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.
10. *Hasebe N., Sukurai K., Hareyama M. et al.* Variations of the radiation belts energetic particles after the July 22–30, 2004 magnetic storms // *Physics of Auroral Phenomena.* Proc. XXXI Annual Seminar. Apatity. P. 17–21. 2008.
11. *Muravjeva E.* On the pitch-angular distribution of the energetic particles accelerated during a strong magnetic storm in the Earth’s radiation belts // *Physics of Auroral Phenomena.* Proc. XXXI Annual Seminar. Apatity. 2008.
12. *Кузнецов С.Н., Мягкова К.Н., Юшков Б.Ю. и др.* Динамика внешнего радиационного пояса во время сильных магнитных бурь по данным КОРОНАС-Ф // *Астрономический вестник.* 2007. Т. 41. № 4. С. 350–359.
13. *Panasjuk M.I.* The ion radiation belts: Experiment and models // *Effects of space weather on technology infrastructure / Ed. By I.A. Daglis.* Washington D.C. AGU. P. 65–90. 2004.