

# СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОНЫ 1-20 МЭВ КАК ИСТОЧНИК ПРОТОННОГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА.

Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Муравьева Е.А.

*Доложено на Межд. Конференции FORBES, Нор-Амберд, Армения, 28.09-3.10 2008г.*

*Принята к публикации Дек.2008*

(Lazutin L.L., Logachev Ju. I., Muravieva E.A. Solar 1-20 MeV protons as a source of the proton radiation belt.)

**Абстракт.** По окончании нескольких магнитных бурь последнего цикла солнечной активности поток протонов 1-20 МэВ в протонном поясе Земли возратал на 1-2 порядка по сравнению со спокойным уровнем. Солнечные космические лучи являются источником этих новых протонных поясов. Мы суммируем новые факты о захвате, ускорении частиц в поясах и о времени жизни последних по измерениям на низковысотных спутниках. Аппроксимация измерений на три последних солнечных цикла показывает, что классический механизм формирования протонного пояса за счет медленной радиальной диффузии доминирует только в течении половины солнечного цикла. Во второй половине повышенная заселенность протонного пояса создается солнечными протонами. Следует вывод о необходимости ревизии сложившихся представлений о формировании и динамике протонного пояса, что выжно и для физики радиационных поясов и для прикладных аспектов космической погоды.

## 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 обновленным, усиленным и источник этого обновления уже не вызывает сомнения - это солнечные космические лучи, хотя по объяснению процесса захвата СКЛ существуют расхождения.

Более распространенная модель основана на радиальной инжекции и дополнительном ускорении частиц в момент SC (Blake et al., 1992, Павлов и др., 1993, Hudson et al., 1997). В работе, впервые доложенной и опубликованной в трудах предыдущей конференции в Нор-Амберде в 2005 г. предлагалась модель перехода протонов СКЛ на замкнутые дрейфовые оболочки на фазе восстановления магнитной бури без инжекции (Лазутин и др., 2006, 2007). Продолжение этой работы принесло новые результаты, во-первых, выяснилось, что может наблюдаться дополнительное ускорение захваченных

протонов до окончания бури или серии бурь, так что новый пояс оказывается заполненным протонами с энергией 1-20 МэВ на 2-3 порядка выше спокойного уровня. Во вторых, стало ясно, что новый пояс сохраняется гораздо дольше, чем мы предполагали раньше, и тем самым вклад СКЛ в протонный пояс может быть весьма существенным по сравнению с традиционным механизмом радиальной диффузии, 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 (Mineevetal., 1983, Павлов и др., 1993), но сведений, позволяющих оценить длительность существования пояса солнечных протонов, в них не было. В ряде публикаций последнего времени появились новые данные, подтверждающие появление СКЛ в протонном поясе во время магнитных бурь ( Lorentzen et al., 2002, Slocum et al., 2002 )

Результаты анализа радиальных профилей солнечных протонов по измерениям на

низковысотных спутниках КОРОНАС-Ф и SERVIS-1 во время сильных бурь 2001-2004 гг. показали, что, по крайней мере, в пяти бурях произошел захват протонов СКЛ. В таблице 1 мы приводим время и мощность бури и границы проникновения СКЛ по публикациям в работах (Lazutin et al., 2008, Kuznetsov et al., 2008, Hasede et al., 2008).

Таблица 1

Маг.Буря	Tмин	Dst	Lмин
06.11.2001	07	-292	2.2
24.11.2001	17h	-221	2.4
29.10.2003	10h	-180	2.6
30.10.2003	01h	-363	2.2
30.10.2003	23h	-401	2.0
22.07.2004	03	-101	3.2
25.07.2004	12	-148	2.9
27.07.2004	14	-197	2.6
08.11.2004	07	-373	2.3
10.11.2004	10	-289	2.1

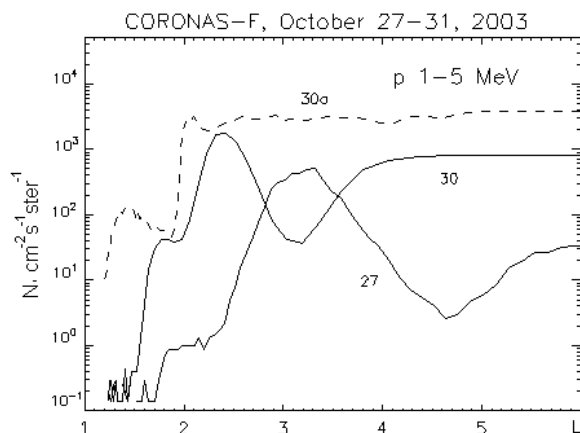


Рис 1 Радиальные профили протонов 1-5 МэВ до начала бури и после бури октября 2003 года, измеренные спутником КОРОНАС-Ф при пролетах над Бразильской магнитной аномалией. Пунктирной линией показан пролет с максимальным приближением к Земле границы проникновения СКЛ.

На рис 1 приведено сравнение радиальных профилей протонов измеренных до начала магнитной бури 29 октября 2003г. и на фазе восстановления при пролетах над Бразильской

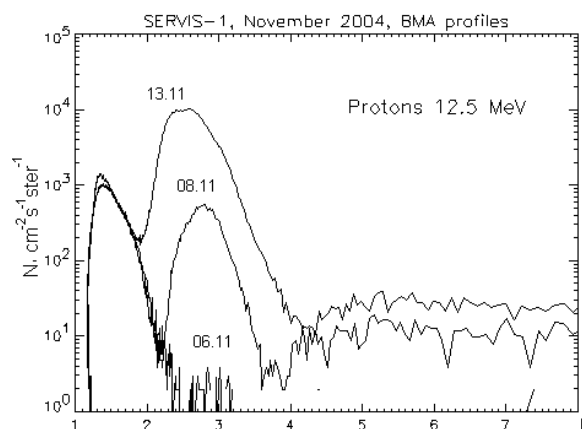


Рис 2 Радиальные профили протонов 12.5 МэВ 07, 08 и 11 ноября 2004 г., спутник SERVIS-1

магнитной аномалией. Пунктирной линией показан профиль в максимуме главной фазы бури, показывающий глубину проникновения протонов СКЛ. Первый, добуревой профиль имеет классическую структуру с максимумом на  $L=3$ . Последний профиль имеет повышенную интенсивность и сдвинут на  $L=2.4$ , что указывает на захват протонов СКЛ, имевших границу проникновения на  $L=2$ .

При анализе захвата протонов во время цепочки магнитных бурь 23-27 июля 2004 г. было впервые зарегистрировано последовательное ускорение захваченных протонов и показано, что оно вызвано радиальным переносом протонов к Земле (Кузнецов и др. 2008). Аналогичный эффект наблюдался и во время магнитной бури 7-12 ноября 2004, которая, кстати, также была составной. На рис 2 приведены радиальные профили протонов с энергией 12.5 МэВ, измеренные на спутнике SERVIS-1, летавшем на высоте 1000км, в два раза выше спутника КОРОНАС-Ф. Поток протонов до бури на  $L=2.9$  чуть выше уровня фона, но после первой бури поток захваченных протонов растет на два порядка, а после второй бури - еще примерно в 30 раз. При этом максимум пояса смещается к Земле сначала на  $L=2.8$  и затем до  $L=2.4-2.6$ . Аналогичную трансформацию претерпевают протоны с энергией 1 МэВ, хотя суммарный рост интенсивности здесь ниже.

Надо отметить, что смещение максимума пояса к Земле наблюдалось и во время бури 20.11.2003, во время которой не было протонов СКЛ в окрестностях Земли, и, соответственно, не было захвата в протонный пояс. Образованный во время бури 29 октября пояс сдвинулся с  $L=2.1$

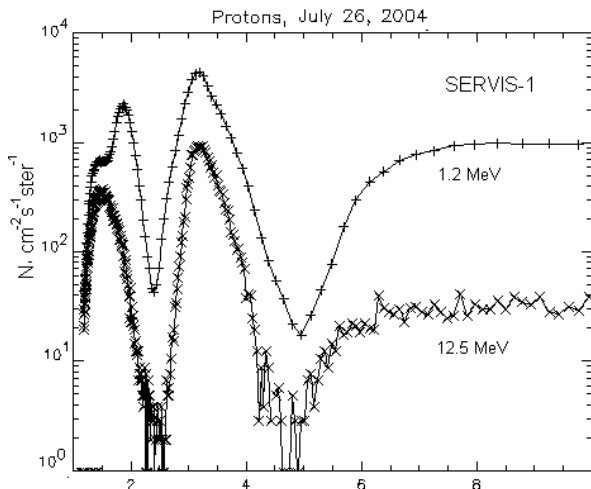


Рис 3 Временной ход суточного максимума интенсивности протонов на  $L=3$  после магнитной бури 22-27 июля 2004 г.

на  $L=1.9$ , и при этом интенсивность в максимуме возросла вдвое (Lazutin et al., 2006).

#### ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПОЯСОВ ПРОТОНОВ СКЛ

На рис 3 приведен пример изменения интенсивности протонов после захвата и ускорения во время июльских бурь 2004г. (Hasebe et al., 2008). Эффект захвата наблюдается в двух энергетических каналах, в канале и только в канале 24 МэВ рост потока во время бури связан с приближением к Земле границы проникновения, т.е. прибор измеряет поток частиц равный потоку в межпланетном пространстве и сразу после окончания бури темп счета возвращается к предбуревому уровню.

Поток частиц в новых протонных поясах СКЛ сначала падает довольно быстро, что вероятно вызвано самовозбуждением ионно-циклотронной неустойчивости, затем, 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, время жизни сокращается с ростом энергии частиц и расстояния от Земли дрейфовой оболочки.

Из приведенного примера видно, что через три месяца поток протонов 12.5 МэВ возвращается к нормальному уровню, а поток протонов 1 МэВ остается на уровне на порядок превышающий спокойный.

На более глубоких оболочках распад пояса

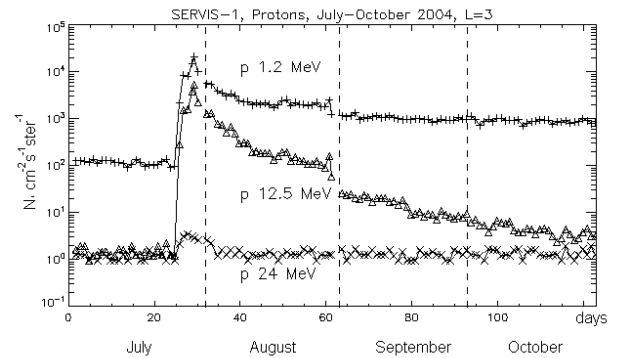


Рис 4 Радиальные профили протонов 1.2 и 12.5 МэВ 26.07.2004

СКЛ идет еще медленнее. При анализе временного хода протонного пояса, образованного 30-31.10.2003 по данным спутника КОРОНАС-Ф отмечалось, что пояс на  $L = 1.9-2.1$  сохранял интенсивность неизменной до начала бури 20.12.2003, а затем интенсивность падала, и за 2 месяца поток протонов 1 МэВ упал до фона. Однако при анализе данных спутника SERVIS-1, запущенного в декабре 2003 г. обнаружилось, что этот пояс не исчез, а сохранялся в течение года. На рис 4 приведены радиальные профили протонов 1 и 12.5 МэВ, измеренные в июле 2004 года. Максимум на  $L = 1.5$  создан присчетами протонов больших энергий внутреннего протонного пояса, на  $L = 3.2$  расположен пояс СКЛ, образовавшийся только что во время июльской бури, а вот на  $L = 1.8$  мы видим старый пояс СКЛ, о котором говорилось выше. И еще через полгода, в ноябрьском событии, он не исчез, а был перекрыт новым поясом СКЛ большей интенсивности. Следовательно, тотфакт, что КОРОНАС-Ф не видит протонов, объясняется другой причиной, например, изменением питч-углового распределения частиц в ловушке.

Сравнение темпов распада протонного пояса на двух спутниках с разной высотой показывает, что уменьшение темпа счета детектора действительно может быть связано как с потерей частиц, так и с изменением питч-углового распределения в сторону увеличения поперечной скорости. Таким образом полученные величины времени жизни есть лишь нижний предел, вблизи экватора поток протонов может сохраняться дольше.

Результаты анализа захвата протонов СКЛ и продолжительности их существования позволяют предположить, что во время сильных магнитных

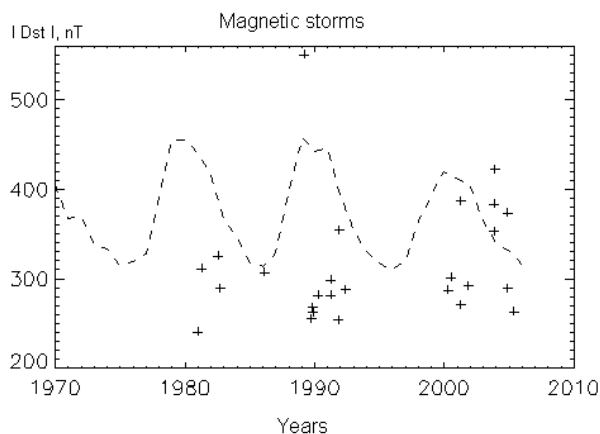


Рис 5. Сильные магнитные бури во время последних трех циклов солнечной активности.

бурь с Dst мин ниже 250 нТл велика вероятность возникновения пояса СКЛ, если одновременно присутствуют на орбите Земли протоны СКЛ, и что существовать такой пояс может не менее года. На рис 5 приведена сводка появления таких событий за последние 3 цикла солнечной активности, с 1076 года. Как было показано в работе (Лазутин, Логачев, 2009), можно ожидать, что половину времени цикла, от максимума до окончания ветви спада, протонный пояс Земли преимущественно создается солнечными космическими лучами, и только половину времени - механизмом радиальной диффузии из авроральной зоны.

## ВЫВОДЫ

По окончании нескольких магнитных бурь последнего цикла солнечной активности поток протонов 1-20 МэВ в протонном поясе Земли возратал на 1-2 порядка по сравнению со спокойным уровнем. Солнечные космические лучи являются источником этих новых протонных поясов. В работе суммированы новые факты о захвате, ускорении частиц в поясах и о времени жизни последних по измерениям на низковысотных спутниках.

- На фазе восстановления сильных магнитных бурь происходит захват на замкнутые дрейфовые оболочки протонов СКЛ с энергией 1-20 МэВ.

- В некоторых случаях после захвата наблюдается дополнительное ускорение протонов нового пояса.

- Пояса СКЛ во внутренней магнитосфере на L 2-3 могут сохранять повышенную интенсивность до года и больше.

- До половины длительности солнечного цикла источником протонного пояса являются солнечные космические лучи.

## Литературе

- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н., Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь. Геом. И аэрон., 2007, т 47, № 2, с187-197
- Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И. О вкладе солнечных космических лучей в формирование протонного пояса Земли, ГиА, 2009, принят к печати
- Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А., Изменения потока частиц радиационных пояса во время сильной магнитной бури 24 марта 1991, Геом. и аэрон, 33, #6, 41-45, 1993.
- 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., 19, 821, 1992.
- Bostrem R. et al., Time history of the inner radiation zone, October 1965-December 1968, J. Geophys. Res., 75, 1246-1256, 1970.
- N. Hasebe, K. Sukurai, M. Hareyama, L. Lazutin, E. Muravieva, Yu. Gotselyuk, I. Myagkova and B. Jushkov, Variations of energetic particles in the radiation belts after the July 22-30, 2004 magnetic storms, In: "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXI Annual Seminar, Apatity, pp. 33-37, 2008
- Hudson, M.K., Elkington S.R., Lyon J.G. et al. Simulations of proton radiation belt formation during storm sudden commencements, J. Geophys. Res. 102, 14087-14102, 1997.
- S.N. Kuznetsov, L.L. Lazutin, M.I. Panasyuk, L.I. Starostin, Yu.V. Gotseliuk, N. Hasebe, K. Sukurai and M. Hareyama, Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23-27, 2004. accepted to SSR, 2008-9
- Kuznetsov, S.N. et al., Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23-27, 2004, J. Adv. Space Res. (2008), doi:10.1016/j.asr.2008.09.014
- 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, 2005, Ed. by A. Chilingarian and G. Karapetyan, Erevan, 2006, p.63-67
- L. Lazutin, E. Muravjeva, M. Panasyuk, N. Hasebe,

K. Sukurai and M. Hareyama

Comparative analysis of the energetic electron and solar proton dynamics during strong magnetic storms. In: "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXI Annual Seminar, Apatity, pp. 17-21, 2008

Lorentzen, K.R., Mazur J.E., Loper M.E., Fennell J.F., and Blake J.B., Multisatellite observations of MeV ion injections during storms, J. Geophys. Res., 107, 1231, 2002.

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, v.3 p. 262-265, 1983.

Slocum, P.L., Lorentzen K.R., Blake J.B., Fennell J.F., Hudson M.K., Looper M.D., Masson G.M., and Mazur J.E., Observations of ion injections during large solar particle events, AGU Fall Meeting, SH61A-0501, 2002.