

# ПРОТОННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ К ЭКВАТОРУ ОТ ИЗОТРОПНОЙ ГРАНИЦЫ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

Т.А. Яхнина, А.Г. Яхнин (Полярный геофизический институт, Апатиты)

## Введение

Протонные высыпания к экватору от изотропной границы являются индикатором развития ионноциклотронной (ИЦ) неустойчивости в экваториальной магнитосфере (Yahnin and Yahnina, 2007). По данным низкоорбитальных спутников NOAA было выделено два типа локализованных высыпаний энергичных ( $\geq$  30 кэВ) протонов (аббревиатура в английской транскрипции - LPEP), соответствующих двум различным режимам циклотронного взаимодействия волн и частиц (Yahnina et al., 2003). Изучение протонных сияний, обусловленных этими высыпаниями, показало, что источник LPEP первого типа локализован как по широте, так и по долготе, существует до нескольких часов, находится, предположительно, на плазмопаузе, и участвует вместе с плазмосферой в коротации (Yahnin et al., 2007, 2012). LPEP второго типа наблюдаются, в основном, в вечернем секторе и возникают при взаимодействии дрейфующих на запад протонов с внешней областью плазмосферного «хвоста». В протонных сияниях этот тип высыпаний отображается в виде «дуги» с долготными размерами в несколько часов MLT в вечернем секторе (Yahnin et al., 2009; Spasojevic and Fuselier, 2009). Общей особенностью этих двух типов высыпаний является их широтный размер (около 1° широты). Различаются эти высыпания тем, что в спектре LPEP второго типа всегда присутствуют протоны с энергией <20 кэВ, в то время как в спектрах LPEP первого типа низкоэнергичные частицы не регистрируются.

Кроме того, во время сжатия магнитосферы при прохождении фронта повышенного давления солнечного ветра могут наблюдаться в дневном секторе кратковременные (длительностью в несколько минут) высыпания протонов с широтными размерами в несколько градусов, также связанные с ИЦ неустойчивостью (Fuselier et al., 2004; Yahnina et al., 2008; Zhang et al., 2008; Попова и др., 2010). В отличие от LPEP первого и второго типов, высыпания протонов во время сжатия магнитосферы, по-видимому, не связаны с границами холодной плазмы (Yahnin et al., 2011).

ИЦ неустойчивость приводит к высыпанию не только протонов с энергиями 10-100 кэВ, но и релятивистских электронов (Summers and Thorne, 2003), обеспечивая потери, как частиц кольцевого тока, так и внешнего радиационного пояса. Представляет интерес рассмотрение областей, где эти потери происходят, их динамики в различных геофизических условиях, в частности, в условиях геомагнитной бури.

Низкоорбитальные спутники NOAA проводят мониторинг потоков различных частиц, в том числе и энергичных протонов. На полярных орбитах на высоте около 800 км постоянно находятся несколько спутников, обеспечивая наблюдения в различных секторах MLT. Все спутники оснащены однотипными детекторами MEPED (Evans and Greer, 2000). Один из каналов этого детектора измеряет потоки высыпающихся протонов с энергией >30 кэВ. Данные измерений таких частиц будут использованы в этой работе. Будут рассмотрены морфологические характеристики высыпаний энергичных протонов и их динамика во время геомагнитной бури 20 ноября 2003 г., главная фаза которой началась в ~2 UT. Минимальное значение Dst индекса составило -472 нТл и оно наблюдалось в 19 UT. Фаза восстановления продолжалась несколько суток пока Dst индекс не вернулся к «предбуревому» значению около -10 нТл.

Надо заметить, что подобное рассмотрение уже было проведено нами в работе (Yahnina et al., 2007), где анализировались протонные высыпания первого и второго типов во время нескольких бурь и было показано, в частности, что морфология этих высыпаний согласуется, соответственно, с морфологией геомагнитных пульсаций Pc1 и КУП, которые являются индикатором ИЦ взаимодействия.

В данной работе мы привлечем к рассмотрению еще один (третий) тип протонных высыпаний, наблюдаемых экваториальнее изотропной границы, который не учитывался в работе (Yahnina et al., 2007). Этот тип высыпаний отличается от высыпаний первого и второго типов широтными размерами (обычно более двух градусов). На рисунке 1 приведен пример наблюдения таких высыпаний. Показаны широтные профили потоков высыпающихся и квази-захваченных протонов с энергией >30 кэВ во время последовательных пролетов спутника NOAA-17. Высыпания, выделенные вертикальной полосой, как раз и соответствуют LPEP третьего типа. Высыпания наблюдаются в дневном секторе на относительно больших широтах в течение многих часов. На некоторых пролетах спутника, к экватору от LPEP третьего типа видны узкие изолированные всплески протонных высыпаний первого типа. Разумеется, деление высыпаний только по такому критерию, как широтный размер, является не вполне однозначным. Тем не менее, мы увидим, что такое деление имеет смысл – высыпания с такими характеристиками наблюдаются, главным образом, в определенных секторе MLT и на определенных широтах.

### Результаты

Наблюдения высыпающихся протонов в рассматриваемый период времени осуществлялись на трех спутниках NOAA (NOAA-15, -16, и -17). Данные этих спутников использованы для регистрации событий LPEP в разных секторах MLT. На верхней панели рисунка 2 приведен Dst индекс за период с 20 по 29 ноября 2003 г. На остальных панелях в виде гистограмм представлено число событий LPEP за каждые 24 часа. За начало отсчета принято время минимума Dst. Главная фаза бури, таким образом, приходится на день под номером «-1», а фаза восстановления - на дни 1-9. Гистограммы на рисунке 2 показывают, что во время геомагнитной бури протонные высыпания разных типов ведут себя по-разному. Число событий LPEP первого типа зарегистрировано на третий и четвертый день восстановительной фазы. Максимальное число событий LPEP первого типа зарегистрировано на третий и четвертый день восстановительной фазы. Максимальное число LPEP второго типа, напротив, зарегистрировано на главной фазе и в первый день фазы восстановления. Число высыпаний третьего типа было мало в начале бури, оно резко возросло на второй день восстановительной фазы, и затем продолжительное время (вплоть до конца восстановительной фазы) высыпания третьего типа превалировали над остальными.



Распределение высыпаний по MLT приведено на рисунке 3, где показано количество событий LPEP для каждого часа MLT рассматриваемой бури. На нижней панели этого рисунка приведено суммарное распределение событий. Видно, что высыпания первого типа наблюдаются, в основном, в утренние часы, второго - в ночные и вечерние часы, а высыпания третьего типа – в дневные часы, причем, число наблюдений высыпаний третьего типа существенно выше остальных.

Рисунок 4 показывает динамику широтного распределения высыпаний разных типов, которое коррелирует с вариацией Dst индекса – понижение Dst индекса сопровождается понижением широты высыпаний и наоборот. При этом высыпания первого и второго типов находятся, в среднем, на одних и тех же широтах (50-60 CGLat), а высыпания третьего типа - примерно на десять градусов выше (60-70 CGLat).

Интенсивность потоков высыпающихся протонов разных типов показана на рисунке 5. Интенсивность высыпающихся протонов всех типов уменьшалась во время фазы восстановления. Максимальные потоки имеют LPEP второго типа. Для них среднее значение интенсивности потока составляет  $4.6*10^6$  (см<sup>2</sup> ср с)<sup>-1</sup>. Разброс значений для LPEP первого и третьего типов очень большой, но в среднем интенсивность потока LPEP первого типа составляет  $5.5*10^5$  (см<sup>2</sup> ср с)<sup>-1</sup>, а интенсивность потока LPEP третьего типа в несколько раз меньше -  $9*10^4$  (см<sup>2</sup> ср с)<sup>-1</sup>.

## Обсуждение

Высыпания протонов третьего типа, также так и высыпания первого и второго типов, наблюдаются к экватору от изотропной границы, что указывает на то, что источником этих высыпаний может быть циклотронное взаимодействие ионов кольцевого тока с электромагнитными волнами.



Мы провели дополнительное исследование для событий, когда высыпания третьего типа наблюдались вблизи меридиана наземной станции Ловозеро. Оказалось, что в этих случаях наземная станция регистрирует геомагнитные пульсации в диапазоне Pc1 (данные не показаны), что является подтверждением связи высыпаний протонов с ИЦ неустойчивостью.



Описанное выше различие морфологических характеристик разных типов LPEP, очевидно, означает, что высыпания протонов третьего типа не являются разновидностью высыпаний, относящихся к первому или второму типу. Это - отдельный вид высыпаний протонов, происходящих на дневной стороне на

относительно высоких широтах. Анализ почти одновременных пролетов разных спутников в дневной области на разных долготах (данные не показаны) показал, что эти высыпания имеют относительно большую долготную протяженность, по сравнению с высыпаниями первого типа. На это же указывает большая вероятность наблюдения таких высыпаний (рисунки 2 и 3). Пространственные размеры и местоположение этих высыпаний подобны тем, что наблюдаются в случае кратковременных вспышек протонного свечения во время сжатия магнитосферы. Можно предположить, что вспышки во время сжатия магнитосферы являются просто усилением протонных высыпаний существующих в дневном секторе практически постоянно (рисунок 1).

Источником ИЦ неустойчивости является поперечная анизотропия температуры горячих протонов. Механизмом ответственным за такую анизотропию на высоких широтах на дневной стороне магнитосферы, может быть, так называемое, «расщепление дрейфовых оболочек», возникающее вследствие постоянно существующей асимметрии магнитного поля Земли (например, Roederer, 1967), либо движение частиц по «орбитам Шабанского» (McCollough et al., 2012).

Работа выполнена в рамках программ президиума РАН № 22 и 4. Работа Т.А. Яхниной частично поддержана грантом РФФИ № 11-02-00397.

#### Список литературы

- Evans, D.S., and Greer M.S. (2000), Polar orbiting environmental satellite space environment monitor. 2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Technical Memorandum OAR SEC-93, Boulder, 2000.
- Fuselier, S. A., S. P. Gary, M. F. Thomsen, E. S. Claflin, B. Hubert, B. R. Sandel, and T. Immel (2004), Generation of transient dayside subauroral proton precipitation // Journal of Geophysical Research, 109, A12227, doi:10.1029/2004JA010393.
- McCollough, J. P., S. R. Elkington, and D. N. Baker (2012), The role of Shabansky orbits in compression-related electromagnetic ion cyclotron wave growth // J. Geophys. Res., 117, A01208, doi:10.1029/2011JA016948.
- Roederer, J. G. (1967), On the adiabatic motion of energetic particles in a model magnetosphere, Journal of Geophysical Research, 72, 981–992.
- Spasojevic, M., Fuselier, S.A. (2009), Temporal evolution of proton precipitation associated with the plasmaspheric plume. Journal of Geophysical Research 114, A12201, http://dx.doi.org/10.1029/2009JA014530.
- Summers, D., and R. M. Thorne (2003), Relativistic electron pitch angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms // Journal of Geophysical Research, 108(A4), 1143, doi:10.1029/2002JA009489.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H., Pierrard V., Popova T.A. (2011), Location of the ion-cyclotron instability region relatively to plasmapause during magnetospheric compressions // Proceedings of 34 Apatity seminar "Physics of auroral phenomena" (Apatity, 1-4 March, 2011). - Apatity: Kola Science Center RAS. -P.57-60.
- Yahnin, A.G., Yahnina T.A., Frey H., Pierrard V. (2012), Sub-oval proton aurora spots: Mapping relatively to the plasmapause. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.018
- Yahnin, A.G., Yahnina, T.A. (2007), Energetic proton precipitation related to ion- cyclotron waves // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69, 1690-1706.
- Yahnin, A.G., Yahnina, T.A., Frey, H.U. (2007), Subauroral proton spots visualize the Pc1 source // Journal of Geophysical Research 112, A10223, http://dx.doi.org/ 10.1029/2007JA012501.
- Yahnin, A.G., Yahnina, T.A., Frey, H.U., Bosinger, T., Manninen, J. (2009), Proton aurora related to intervals of pulsations of diminishing periods // Journal of Geophysical Research 114, A12215, http://dx.doi.org/10.1029/2009JA014670.
- Yahnina T.A., and Yahnin A.G. (2007), Dynamics of localized precipitation of energetic protons during geomagnetic storms // Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual Seminar "Physics of auroral phenomena" (Apatity, 27 February-2 March, 2007). –Apatity: Kola Science Center RAS. -P.15-18.
- Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J., Evans D.S., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Thomsen M.F., Reeves G.D., Gvozdevsky B.B. (2003), Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // Annales Geophysicae V. 21(12). P. 2281–2292.
- Yahnina, T.A., Frey, H.U., Bosinger, T., Yahnin, A.G. (2008). Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion-cyclotron interaction // Journal of Geophysical Research 113, A07209, http://dx.doi.org/10.1029/ 2008JA013099.
- Zhang, Y., Paxton, L.J., Zheng, Y. (2008). Interplanetary shock induced ring current auroras // Journal of Geophysical Research 113, A01212, http://dx.doi.org/ 10.1029/2007JA012554.
- Попова Т.А., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А. Фрей Х. (2010), Взаимосвязь между резкими увеличениями динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1 // Геомагнетизм и аэрономия T50(5). С.568-575.