

## СВЯЗЬ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

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

**Аннотация.** Ранее по данным спутников *NOAA POES* для 38-дневного интервала, было выявлено три типа высыпаний релятивистских (~1 МэВ) электронов (ВРЭ), имеющих разные механизмы рассеяния в конус потерь: 1) ВРЭ в окрестности границы изотропизации; 2) ВРЭ, наблюдаемые внутри анизотропной зоны одновременно с высыпанием энергичных (>30 КэВ) электронов; 3) ВРЭ, регистрируемые одновременно с высыпанием энергичных протонов. В этой работе рассмотрена зависимость этих типов ВРЭ от геомагнитной активности. С этой целью выбраны три интервала одинаковой длительности, характеризующиеся разным средним уровнем геомагнитной активности. Показано, что вероятность наблюдения ВРЭ имеет тенденцию к росту при увеличении активности. Средняя интенсивность потока каждого типа ВРЭ зависит от среднего по интервалу уровня активности. Сделан вывод о том, что зависимость ВРЭ разных типов от геомагнитной активности определяется особенностями механизмов высыпаний и их связью с конфигурацией плазмосферы и магнитосферы.

### Введение

Считается, что одним из главных механизмов ускорения электронов плазменного слоя до релятивистских энергий является взаимодействие с низкочастотными волнами (например, с ОНЧ хорами), которые генерируются во время инъекций плазмы во внутреннюю магнитосферу во время геомагнитных возмущений. При этом характерное время увеличения потока релятивистских электронов (РЭ) после инъекции составляет около суток. Уменьшение потока РЭ в магнитосфере происходит за счет потерь либо на магнитопаузе, либо при рассеянии в конус потерь и, соответственно, высыпания в атмосферу. Рассеяние РЭ в конус потерь связано с нарушением адиабатичности движения частиц либо в области малого радиуса кривизны магнитного поля, либо при взаимодействии с низкочастотными волнами. В магнитосфере наблюдается большое разнообразие волн, способных рассеивать частицы по питч-углам. Генерация этих волн происходит в различных областях магнитосферы и в различных условиях.

Разделение ВРЭ по типам, соответствующим разным механизмам, было проведено нами в недавней работе [Yahnin et al., 2014], на основе сопоставления ВРЭ и высыпаний энергичных (>30 кэВ) электронов и протонов для 38-дневного интервала 24 июля -30 августа 2005 г. Было выделено три типа высыпаний (см. рис. 1 в работе [Yahnin et al., 2014]). Первый тип ВРЭ связан с изотропизацией потока в экваториальной плоскости магнитосферы в области малого радиуса кривизны магнитного поля и наблюдается на внешней границе проекции радиационного пояса на ионосферу, в окрестности изотропной границы (ИГ). Мы обозначим этот тип как ВРЭ-ИГ. Второй тип ВРЭ связан с одновременными высыпаниями энергичных электронов (ВРЭ-ЭВ). Эти высыпания могут быть обусловлены взаимодействием с волнами вистлеровского типа (плазмосферный хисс), экваториальными магнитозвуковыми волнами, электростатическими верхнегибридными волнами [Thorne, 2010; Shklyar, 2006]. Наконец, третий тип ВРЭ связан с одновременными высыпаниями энергичных протонов (ВРЭ-ПВ) внутри зоны захвата протонов. Поскольку такие протонные высыпания в этой области связывают с ЭМИЦ волнами [например, Yahnin and Yahnina, 2007], считается, что такие ВРЭ – есть результат рассеяния релятивистских электронов в конус потерь при развитии ионно-циклотронной неустойчивости [Thorne, 2010].

В этой работе мы попытались определить, как ВРЭ разных типов связаны с геомагнитной активностью. Для этого, в дополнение к относительно возмущенному интервалу 2005 г. ( $\langle Kp*10 \rangle = 20.1$ ;  $\langle AE \rangle = 229$ ;  $\langle Dst \rangle = -14.3$ ), мы рассмотрели еще два 38-дневных интервала: 9 марта – 15 апреля 2011 г. ( $\langle AE \rangle = 155$ ;  $\langle Kp*10 \rangle = 15.4$ ;  $\langle Dst \rangle = -11.1$ ) и 11 февраля – 20 марта 2009 г. ( $\langle AE \rangle = 74$ ;  $\langle Kp*10 \rangle = 11.5$ ;  $\langle Dst \rangle = -5.8$ ). Были обработаны данные с тех же спутников, что и в работе [Yahnin et al., 2014]. Таким образом, общее время наблюдения, количество орбит спутников и пространственное покрытие в трех выбранных интервалах были одинаковыми.

### Результаты

Наблюдавшиеся в течение двух дополнительных интервалов ВРЭ также соответствовали описанной выше классификации. Морфологические особенности ВРЭ разных типов в разных интервалах оказались такими же, какие были найдены в работе [Yahnin et al., 2014]: высыпания первого типа наблюдаются в ночные часы; высыпания второго типа имеют широкую протяженность по MLT и имеют максимум вероятности наблюдения в предполуденные часы; высыпания третьего типа наблюдаются в вечерние часы. При этом общее количество событий ВРЭ и соотношение высыпаний разных типов в эти интервалы различаются.

На рис. 1 показаны вариации количества событий ВРЭ для каждого из трех интервалов (высота каждого вертикального столбца – это количество событий, наблюдавшихся за три часа). На верхних трех панелях показаны события первого, второго и третьего типов; на четвертой – их сумма. Три нижние панели показывают вариации индексов геомагнитной активности:  $K_p$ , Dst, и АЕ. Из этого рисунка видно, что высыпания разных типов имеют тенденцию группироваться в периоды усиления геомагнитной активности, хотя наблюдаются не всегда синхронно.

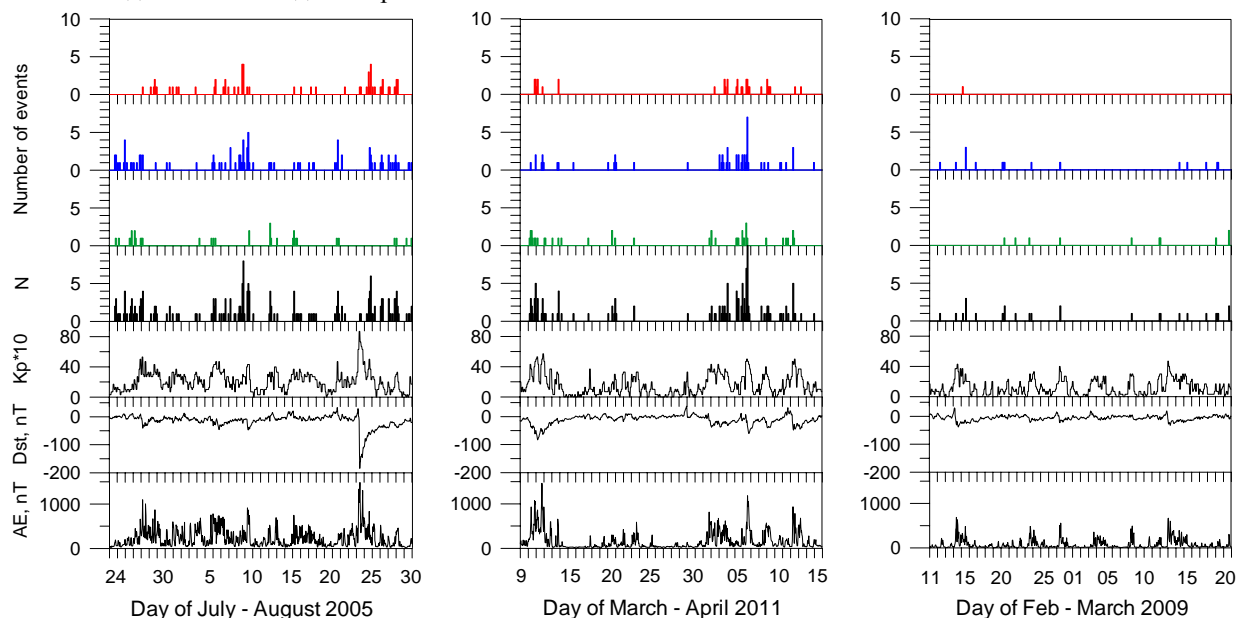


Рисунок 1

Число событий ВРЭ разных типов, отсортированных по значениям среднечасового АЕ-индекса с шагом 100 нТл, показано на трех верхних панелях рис. 2. Следующая панель показывает число часов с определенным значением АЕ-индекса в рассматриваемом 38-дневном интервале, а три нижних панели – вероятность наблюдения событий ВРЭ разных типов в зависимости от АЕ-индекса. Для всех трех интервалов явно видно, что вероятность наблюдения имеет тенденцию к росту при увеличении АЕ индекса. (При этом, надо заметить, что в период главной фазы большой бури 24 августа 2005 г. с минимальным Dst = -184 нТл, и максимальным АЕ = 1484 нТл ВРЭ не наблюдались.) Аналогичные зависимости имеют место и для других индексов геомагнитной активности ( $K_p$  и Dst).

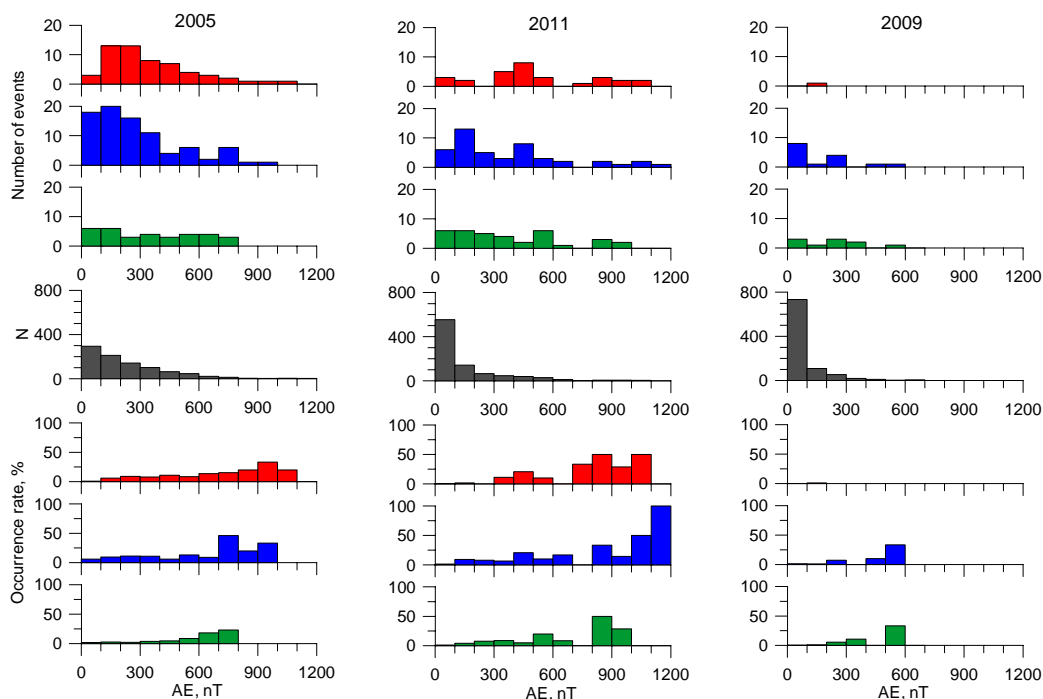


Рисунок 2

Количество событий высыпаний релятивистских электронов каждого типа во время трех 38-дневных интервалов и средние интенсивности потоков РЭ приведены в табл. 1. Кроме того, в этой таблице показаны как средние значения индексов геомагнитной активности в периоды наблюдения ВРЭ, так и средние значения этих индексов для каждого 38-дневного интервала. Наибольшее суммарное количество событий (195) наблюдается во время интервала с максимальным средним значением магнитной возмущенности в 2005 г. ( $\langle AE \rangle = 229$  нТл), а наименьшее количество событий (27) – в интервале с минимальной активностью в 2009 г. ( $\langle AE \rangle = 74$  нТл). Интенсивность событий ВРЭ так же уменьшается с уменьшением средней активности в интервале. При этом максимальные интенсивности во всех интервалах наблюдаются для событий ВРЭ, связанных с протонными высыпаниями, а минимальные для ВРЭ на краю области захвата. Интересно отметить, что в интервале 2011 г., который характеризуется промежуточными значениями средних индексов активности, значения индексов во время событий ВРЭ заметно выше, чем в остальные интервалы, включая «возмущенный» интервал 2005 г. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что событий с большой возмущенностью в интервале 2011 г. было относительно мало, и они не дали существенного вклада в средние значения индексов.

Таблица 1.

Год интервал	Тип ВРЭ	$\langle AE \rangle$ , нТл	$\langle Kp * 10 \rangle$	$\langle Dst \rangle$ , нТл	Число событий ВРЭ	Средняя скорость счета РЭ
2005 24.07-30.08	ВРЭ-ИГ	343	32.0	-28.8	62	19.2
	ВРЭ-ЭВ	313	26.2	-16.2	99	25.8
	ВРЭ-ПВ	354	26.9	-8.5	34	50.5
	весь интервал	<b>229</b>	<b>20.9</b>	<b>-14.3</b>	<b>195</b>	
2011 09.03-15.04	ВРЭ-ИГ	559	34.8	-33.7	35	13.8
	ВРЭ-ЭВ	444	31.8	-20.4	58	11.1
	ВРЭ-ПВ	394	32.3	-20.0	41	37.9
	весь интервал	<b>155</b>	<b>15.4</b>	<b>-11.1</b>	<b>134</b>	
2009 11.02-20.03	ВРЭ-ИГ	132	37.0	-20.0	1	7.0
	ВРЭ-ЭВ	193	18.2	-7.8	16	10.8
	ВРЭ-ПВ	211	19.5	-6.0	10	13.7
	весь интервал	<b>74</b>	<b>11.5</b>	<b>-5.8</b>	<b>27</b>	

Рис. 3 представляет данные табл. 1 в графическом виде. Слева и справа приведены, соответственно, «зависимости» числа событий ВРЭ и их средней интенсивности от индексов геомагнитной активности для трех временных интервалов. Три типа ВРЭ отмечены, соответственно крестиками, ромбами и треугольниками. Суммарное число событий отмечено кружками. Здесь нужно отметить особенность событий РВЭ-ПВ. Для них в интервале 2005 г. нарушается тенденция к росту числа событий с ростом активности.

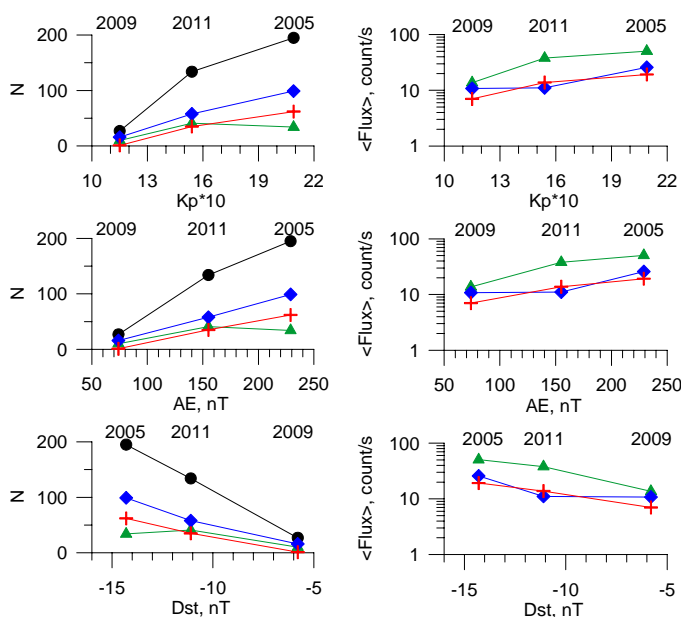


Рисунок 3

### Обсуждение

Мы рассмотрели три интервала с различным характером геомагнитной активности. Лишь в одном из интервалов имела место сильная геомагнитная буря (24 августа 2005 г.), которой предшествовала перманентная возмущенность. Два других интервала характеризовались сериями активизаций перемежающимися с относительно спокойными периодами. Поскольку процессы во время бури считаются основными источниками пополнения внутренней магнитосферы энергичными частицами и их последующего ускорения до релятивистских энергий, исследования ВРЭ, в основном, проводились для периодов достаточно интенсивных геомагнитных бурь. Статистические данные [например, Meredith et al., 2011] показывают уменьшение потока ВРЭ во время главной фазы бури и его возрастание во время фазы восстановления с задержкой

1-2 дня относительно минимума Dst. Эти результаты согласуются с динамикой ускорения энергичных электронов в ближней магнитосфере за счет их взаимодействия с ОНЧ хорами и другими низкочастотными волнами. В работе [Meredith *et al.*, 2002] показано, что ключевым фактором для появления ОНЧ-хоров и ускорения электронов до релятивистских энергий является наличие во время восстановительной фазы бури последовательности суббурь. Последовательность суббурь может привести к ускорению электронов и без признаков бури [Meredith *et al.*, 2002; Shiller *et al.*, 2014].

Значительная часть возмущений во время рассмотренных нами интервалов как раз относится к последовательности суббурь. Следовательно, независимо от наличия и интенсивности бурь в рассмотренных интервалах, были созданы условия для ускорения электронов. При этом, чем дольше длится последовательность возмущений, а следовательно, дольше поддерживается повышенный фон волновой активности и продолжается процесс ускорения, тем больше интенсивность потока ускоренных электронов, захваченных в радиационном поясе.

В то же время, в работах [Thorne and Larsen, 1976; Лазутин, 2013] было показано, что высыпание релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса может происходить как непосредственный отклик на суббурю. По-видимому, это обусловлено взаимодействием РЭ с различными низкочастотными волнами, генерируемыми при суббуревой инжекции энергичных протонов и электронов во внутреннюю магнитосферу. Высыпание происходит в результате процесса диффузии по питч-углам уже имеющихся в радиационном поясе релятивистских электронов, за которые ответственны предшествующие возмущения и инжекции. Это объясняет зависимость интенсивности потоков высыпающихся электронов от средних за интервал индексов активности.

Взаимодействие электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн с релятивистскими электронами часто считают основным механизмом ВРЭ, поскольку эти волны имеют максимальные амплитуды в магнитосфере. Индикатором развития ИЦ неустойчивости являются высыпания протонов. Морфология ВРЭ-ПВ согласуется с представлениями о генерации ИЦ неустойчивости в области плазмосферного плюма на вечерней стороне. Плазмосферный плюм образуется во время умеренной геомагнитной активности и исчезает во время сильных возмущений, когда плазмосфера становится компактной и симметричной. Это объясняет уменьшение числа событий ВРЭ-ПВ в период большой активности.

Генерация плазмосферного хисса, экваториальных магнитозвуковых волн, электростатических верхнегибридных волн, которые могут быть ответственны за рассеяние РЭ по питч-углам, не зависит от формы плазмопаузы. Вероятно, это является причиной, по которой число событий ВРЭ-ЭВ прямо зависит от среднего уровня активности.

В событиях РЭ-ИГ механизм высыпаний связан не с волнами, а с конфигурацией магнитосферы. Во время сильных возмущений магнитные силовые линии на ночной стороне магнитосферы вытянуты, изотропная граница электронов (в том числе и релятивистских) приближается к Земле и оказывается в области внешнего края радиационного пояса. Чем больше активность, тем ближе к Земле область нарушения адиабатичности движения электронов и, соответственно, больше потоки электронов, рассеянных в конус потерь. При малой активности силовые линии становятся дипольными, изотропная граница отодвигается на большие расстояния, и может выйти за пределы радиационного пояса. Это приводит как к уменьшению потока высыпаний, так и уменьшению числа событий ВРЭ-ИГ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-12-20005.

## Список литературы

- Meredith, N. P., R. B. Horne, R. H. A. Iles, R. M. Thorne, D. Heynderickx, and R. R. Anderson (2002), Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus, *J. Geophys. Res.*, 107, NO. A7, 1144, 10.1029/2001JA900146.
- Meredith, N. P., R. B. Horne, M. M. Lam, M. H. Denton, J. E. Borovsky, and J. C. Green (2011), Energetic electron precipitation during high speed solar wind stream driven storms, *J. Geophys. Res.*, 116, A05223, doi:10.1029/2010JA016293.
- Schiller, Q., X. Li, L. Blum, W. Tu, D. L. Turner, and J. B. Blake (2014), A nonstorm time enhancement of relativistic electrons in the outer radiation belt, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058485.
- Thorne R. M. and T. R. Larsen (1976), An Investigation of Relativistic Electron Precipitation Events and Their Association With Magnetospheric Substorm Activity, *J. Geophys. Res.*, 81, 5501-5506.
- Thorne, R. M. (2010), Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990.
- Yahnin A. G., T. A. Yahnina, N. V. Semenova, B. B. Gvozdevsky (2014), Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES *Proceedings of XXXVII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (25-28 February, 2014)*. - Apatity: Kola Science Center RAS. 2014. -P.46-50.
- Лазутин Л. Л. (2013), Инжекция релятивистских электронов во внутреннюю магнитосферу во время магнитных бурь: связь с суббурами // *Геомагнетизм и аэронавтика*, т. 53, N 6.-С.762-778.
- Shklyar, D. R., and B. Kliem (2006), Relativistic electron scattering by electrostatic upper hybrid waves in the radiation belt, *J. Geophys. Res.*, 111, A06204, doi:10.1029/2005JA011345.