

DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.114-117

СВЯЗЬ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ РАЗНЫХ ТИПОВ С ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Т.А. Яхнина, Н.В.Семенова, А.Г. Яхнин

ФБГНУ Полярный геофизический институт, Апатиты

Аннотация. Связь высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) разных типов, наблюдавшихся на низкоорбитальных спутниках NOAA POES, с геомагнитной активностью рассмотрена для трех 184-дневных интервалов, характеризующихся разными уровнями геомагнитной возмущенности. Показано, что вероятность наблюдения и средний поток высыпающихся релятивистских электронов растет с ростом уровня геомагнитной возмущенности для всех рассмотренных типов высыпаний. Для разных уровней геомагнитной активности построены карты вероятности наблюдения ВРЭ в координатах *L-MLT*.

Abstract. Relationship between relativistic electron precipitation (REP) of different types, which are observed with NOAA polar orbiting environmental satellites (POES), and geomagnetic activity is considered on the basis of data obtained during three 184-day intervals which are characterized by geomagnetic disturbances of different intensity. It is shown that both the probability of REP observations and the mean REP intensity increase when the level of geomagnetic activity increases. This holds true for every REP type. The maps of the REP occurrence rate in the *L-MLT* coordinates are constructed for different levels of the geomagnetic activity.

Введение

Зависимость высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) от геомагнитной активности изучена довольно слабо. Большинство исследований взаимосвязи потоков релятивистских электронов с активностью (см., например, [1] и ссылки в этой работе) относятся к захваченной компоненте, поскольку они основывались на данных магнитосферных спутников (например, геостационарных), приборы которых не могли измерять потоки частиц в конусе потерь. Исследования взаимосвязи ВРЭ с активностью по данным низкоорбитальных спутников касались, в основном, вариаций потоков релятивистских электронов во время геомагнитных бурь [2-4].

В работах [5, 6] проведено разделение событий ВРЭ на три группы, которые соответствуют разным механизмам рассеяния релятивистских электронов в конус потерь. Это разделение основано на сопоставлении ВРЭ, зарегистрированных на спутниках NOAA POES, с высыпаниями энергичных (>30 кэВ) электронов и протонов. События ВРЭ *первой группы* наблюдаются на внешней границе радиационного пояса, в окрестности изотропной границы [7] и, вероятно, связаны с изотропизацией потока в экваториальной плоскости магнитосферы в области малого радиуса кривизны магнитного поля. События *второй группы* связаны с одновременными высыпаниями субрелятивистских электронов. Эти высыпания могут быть обусловлены взаимодействием с волнами вистлеровского типа (плазмасферный хисс), либо с электростатическими верхнегибридными волнами [8, 9]. Наконец, события ВРЭ *третьей группы* связаны с одновременными высыпаниями энергичных протонов внутри зоны захвата протонов. Поскольку такие протонные высыпания связывают с ЭМИЦ волнами [10], считается, что ВРЭ третьей группы – это результат рассеяния релятивистских электронов в конус потерь при развитии ионно-циклотронной неустойчивости (см., например, работу [7] и ссылки в ней).

В данной работе мы проведем рассмотрение зависимости вероятности наблюдения и интенсивности потока ВРЭ для этих трех групп от геомагнитной активности.

Данные

События ВРЭ определялись по данным прибора MERED на спутниках серии POES (NOAA-15, -16, -17, -18) (см., описание характеристик прибора в работе [5]). Использовались данные, полученные в течение трех полугодических интервалов с июля по декабрь в 2005, 2009, 2011 гг. Эти три интервала характеризуются разной средней геомагнитной активностью: слабой (2009 г.), умеренной (2011 г.) и относительно высокой (2005 г.). На рис. 1, который показывает вариации параметров, характеризующих солнечную активность, состояние солнечного ветра, и геомагнитную активность, эти интервалы выделены серыми вертикальными полосами. Значения индексов геомагнитной активности (K_p , Dst, AE) с различным временным разрешением взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

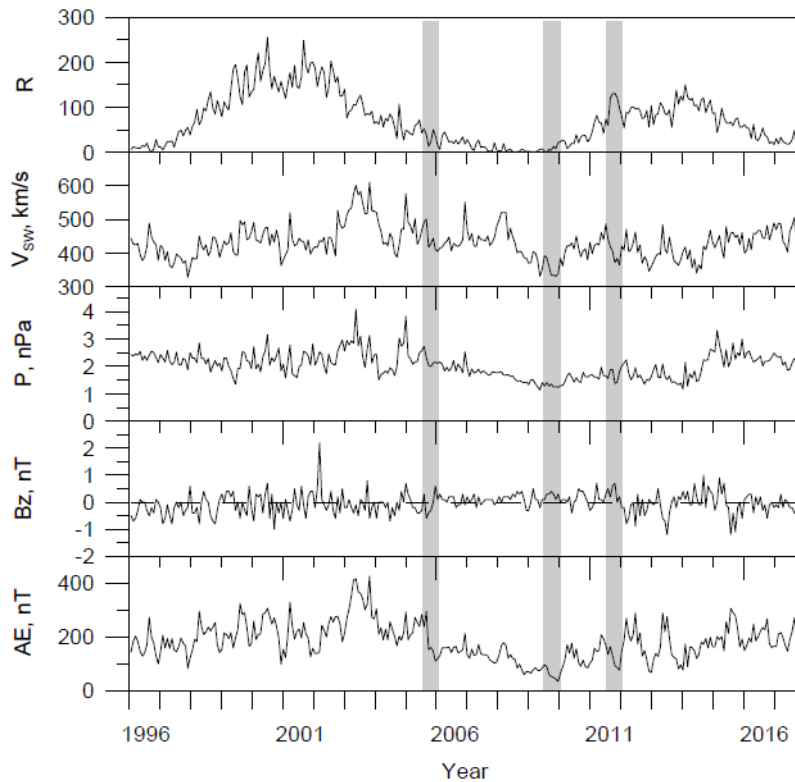


Рисунок 1. Вариации чисел Вольфа, скорости и динамического давления солнечного ветра, вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля и AE-индекса в течение 23-го и 24-го циклов солнечной активности.

Результаты

В таблице 1 приведены сведения о количестве событий ВРЭ в каждом интервале и в каждой группе, средние потоки релятивистских электронов (в единицах скорости счета прибора) и информация о среднем уровне геомагнитной активности в каждом интервале и во время событий ВРЭ. Максимальное количество событий ВРЭ было зафиксировано в наиболее активный период в 2005 г. (1057 событий), минимальное – в интервале минимальной возмущенности в 2009 г. (69 событий).

Из таблицы видно, что процентное содержание ВРЭ разных групп не остается постоянным при различной активности. Доля ВРЭ первой группы меняется от 26% в интервале с высокой активностью (2005 г.) до 7% в спокойных условиях (2009 г.). Доля событий второй группы варьируется от 59% до 74%, а доля событий третьей группы от 13% до 19%.

Обращает на себя внимание тот факт, что события ВРЭ (как в целом, так и в каждой группе) наблюдаются при большей активности, по сравнению со средней активностью в соответствующем интервале. Так, Кр-индекс во время событий ВРЭ в 2005 г. в среднем был равен 32.4 (по группам, соответственно, 36, 31.4, 30.4), а средний Кр-индекс в июле-декабре 2005 г. равнялся 20.5. В 2011 г. среднее значение Кр-индекса составляло 14.2, а ВРЭ наблюдались при средней активности 30.9. В 2009 г. среднее значение Кр составило 7.8, а во время ВРЭ – 16.7. То же самое можно сказать про индексы Dst и AE. Исключение составляет лишь значение индекса Dst для событий третьей группы в 2005 г., когда средние значения этого индекса во всем интервале и во время ВРЭ были почти одинаковыми.

Средняя скорость счета релятивистских электронов в 2005 г. составила 30.9 (по группам 25.5, 24.9, 63.8, соответственно), в 2011 г. – 16.8 (17.7, 13.9, 29.6), а в 2009 – 10 (5.5, 9.8, 12.1). Таким образом, как в целом, так и в каждой группе, средняя интенсивность потока высыпавшихся релятивистских электронов показывает явную зависимость от средних значений индексов геомагнитной активности в рассматриваемых интервалах.

На рис. 2 показано глобальное распределение вероятности наблюдения ВРЭ различных групп в 2005 г. в зависимости от геомагнитной активности: слабой ($AE < 100$ нТл, верхняя панель), умеренной ($100 < AE < 300$ нТл, средняя панель) и высокой ($AE > 300$ нТл, нижняя панель). Вероятность наблюдения определялась как отношение числа пролетов спутников, на которых наблюдались ВРЭ, к общему числу пролетов этих спутников через ячейку с размерами $1 R_E$ по L и 1 час по MLT .

Таблица 1

Номер группы ВРЭ /год	Число событий ВРЭ	Процентное содержание событий данной группы	Средний поток (скорость счета)	Кр*10	Dst	AE	Кр*10	Dst	AE
				Среднее значение в моменты ВРЭ			Среднее значение за июль- декабрь		
1/2005	276	26.1	25.5	36	-36.4	435	20.5	-16	213
2/2005	621	58.8	24.9	31.4	-27.6	407			
3/2005	160	15.1	63.8	30.2	-15.4	387			
Все/2005	1057	100	30.9	32.4	-28	411			
1/2011	76	21.7	17.7	34.2	-26.2	452	14.2	-12.7	129
2/2011	228	65.1	13.9	29.3	-21.7	357			
3/2011	46	13.2	29.6	33.5	-19.9	467			
Все/2011	350	100	16.8	30.9	-22.2	392			
1/2009	5	7.3	5.5	18.6	-4.2	203	7.8	-2.5	63
2/2009	51	73.9	9.8	15	-5.1	151			
3/2009	13	18.8	12.1	22.4	-8.3	229			
Все/2009	69	100	10	16.7	-5.6	170			

События первой группы наблюдаются главным образом в полуночном секторе. При низкой активности ($AE < 100$ нТл) область этих высыпаний располагается в узком секторе MLT на $L=6-7$. Максимальное значение вероятности наблюдения таких событий составляет менее 2%. С ростом геомагнитной активности область ВРЭ первой группы расширяется по MLT, оставаясь в ночном секторе, и в сторону меньших L-оболочек. Вероятность наблюдения в максимуме достигает 6% при $AE > 300$ нТл.

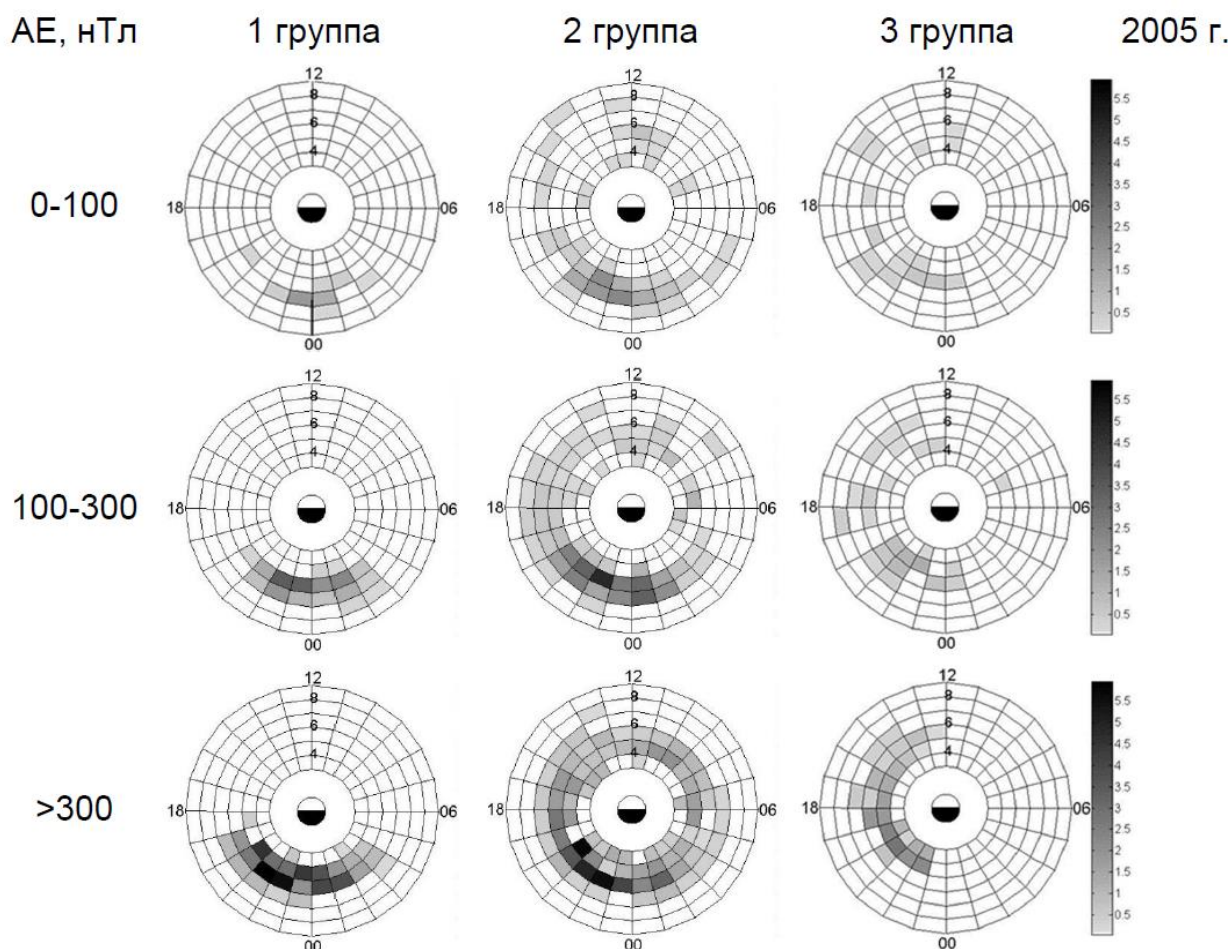


Рисунок 3. Вероятность наблюдения высыпаний релятивистских электронов в координатах L -MLT для разных групп высыпаний и разных уровней геомагнитной активности.

События второй группы, хотя и имеют максимальную вероятность наблюдения в предполуночные часы, могут наблюдаться во всех секторах MLT. Максимальная вероятность наблюдения ВРЭ этой группы также растет с ростом активности от 2.5% при AE<100 нТл до 6-7% при AE>300 нТл. События третьей группы наблюдаются в вечернем секторе. Максимальная вероятность наблюдения растет с 1 до 3% при росте геомагнитной активности. Подобные карты для 2011 и 2009 гг. (здесь не приводятся) показывают похожие распределения, но значения вероятности наблюдения ВРЭ в эти годы, соответственно, ниже.

Обсуждение

Известно, что потоки захваченных в магнитосфере релятивистских электронов плохо коррелируют с *текущей* геомагнитной активностью [1]. Это, очевидно, связано с тем, что за появление релятивистских частиц ответственны процессы ускорения, происходящие в течение достаточно длительного времени (до нескольких суток). Поскольку высыпание представляет собой результат рассеяния захваченных частиц в конус потерь, ожидать хорошей корреляции интенсивности отдельных событий ВРЭ с *текущей* активностью также не приходится. Зависимость *средней* интенсивности ВРЭ от *средней* геомагнитной активности (Таблица 1), объясняется, по-видимому, тем, что усреднение за длительный интервал времени «учитывает» предысторию геомагнитной активности для событий ВРЭ в этом интервале.

Из рис.2 следует, что морфология ВРЭ разных групп, описанная в [5, 6], при росте активности остается неизменной, но растет вероятность наблюдения высыпаний и размеры области, в которой высыпания могут наблюдаться. Для событий ВРЭ первой группы это, очевидно, объясняется динамикой изотропной границы. При росте активности область контакта изотропной границы с внешним радиационным поясом приближается к Земле и расширяется в долготном направлении. События ВРЭ второй и третьей групп связаны с рассеянием на волнах. Известно, что интенсивность и размеры областей генерации волн в магнитосфере увеличиваются с ростом геомагнитной активности (например, [11]). Это объясняет рост вероятности наблюдения ВРЭ второй и третьей групп и расширение областей наблюдения этих ВРЭ с ростом геомагнитной активности (Таблица 1 и рис. 2).

Благодарности

Работа Н.В. Семенов и А.Г. Яхнина поддержана грантом РНФ 15-12-20005.

Литература

1. Lyatsky, W., and G. V. Khazanov (2008), Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit, J. Geophys. Res., 113, A08224, doi:10.1029/2008JA013048.
2. Nakamura, R., M. Isowa, Y. Kamide, D. N. Baker, J. B. Blake, and M. Looper (2000), SAMPEX observations of precipitation bursts in the outer radiation belt, J. Geophys. Res., 105(A7), 15,875–15,885, doi:10.1029/2000JA900018.
3. Horne, R. B., M. M. Lam, and J. C. Green (2009), Energetic electron precipitation from the outer radiation belt during geomagnetic storms, Geophys. Res. Lett., 36, L19104, doi:10.1029/2009GL040236.
4. 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.
5. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, N. V. Semenova, B. B. Gvozdevsky, and A. B. Pashin (2016), Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 8286–8299, doi:10.1002/2016JA022765.
6. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, T. Raita, and J. Manninen (2017), Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 9169–9182, doi:10.1002/2017JA024249.
7. Sergeev, V. A., and N. A. Tsyganenko (1982), Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model, Planet. Space Sci., 30, 999–1006, doi:10.1016/0032-0633(82)90149-0.
8. Thorne, R. M. (2010), Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions, Geophys. Res. Lett., 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990.
9. 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.
10. Yahnin, A. G., and T. A. Yahnina (2007), Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 69(14), 1690–1706, doi:10.1016/j.jastp.2007.02.010.
11. Meredith, N. P., R. B. Horne, R. M. Thorne, D. Summers, and R. R. Anderson (2004), Substorm dependence of plasmaspheric hiss, J. Geophys. Res., 109, A06209, doi:10.1029/2004JA010387.