

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.006

АНАЛИЗ УСКОРЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИНТЕРВАЛА С МАГНИТНОЙ БУРЕЙ И БЕЗ НЕЕ В МАЕ-ИЮНЕ 2017 ГОДА

В.Б. Белыховский¹, В.А. Пилипенко², Е.Е. Антонова^{3,4}, К. Шиокава⁵,
Ю. Миёси⁵, Ю. Касахара⁶, С. Касахара⁷, Н. Хигасио⁸

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

³Институт ядерной физики им. Скобелевца МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт космических исследований, Москва, Россия

⁵Институт космических и земных исследований окружающей среды, Нагоя, Япония

⁶Канадзавский университет, Япония

⁷Токийский университет, Япония

⁸Японское агентство аэрокосмических исследований, Япония

Аннотация. В данной работе исследуются вариации потоков релятивистских электронов и волновой активности в магнитосфере Земли с целью определения вклада различных механизмов ускорения (УНЧ механизм, ОНЧ механизм и бетатронный механизм) по данным спутников Arase и GOES. УНЧ индекс, разработанный в ИФЗ РАН, использовался для характеристики волновой активности магнитосферы в диапазоне Pc5 пульсаций. Для характеристики активности ОНЧ-волн в магнитосфере использовались данные спутника Arase (инструмент PWE). Детально изучена сильная геомагнитная буря 27-29 мая 2017 г. и интервал без бури перед ней. Показано, что в рассматриваемых событиях значения потоков релятивистских электронов во время магнитных бурь (со средней скоростью солнечного ветра) больше, чем для интервалов без магнитных бурь с высокой скоростью солнечного ветра. Необходимым условием увеличения потоков релятивистских электронов является рост AE индекса. Основной особенностью действия различных механизмов ускорения является рост потоков релятивистских электронов на 1,5-2 порядка через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, рост мощности ОНЧ излучения. Анализ показывает, что рост ОНЧ и УНЧ волновой активности происходит примерно в одно и то же время и совпадает с ростом суббулевой активности. Поэтому достаточно сложно разделить вклад этих механизмов во времени. Во время магнитных бурь максимум интенсивности потока релятивистских электронов смещается на более низкие L-оболочки по сравнению с интервалами без магнитных бурь. Его положение хорошо соответствует кривой Тверской, и может эффективно работать механизм ускорения, связанный с инжекцией электронов в область ослабленного кольцевым током магнитного поля и последующим их бетатронным ускорением при восстановлении магнитного поля.

1. Введение

Потоки релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе изменяются в широких пределах, особенно в периоды повышенной геомагнитной активности. Одной из важных проблем космической погоды является ускорение энергичных электронов до релятивистских энергий (несколько МэВ) во внешнем радиационном поясе. Релятивистские электроны могут вывести из строя электронное оборудование на спутниках, вызвать сбои связи и повлиять на дозу облучения космонавтов [Pilibenko et al., 2006]. Однако механизм магнитосферного ускорения до релятивистских энергий до сих пор остается проблемой для космической физики.

В бесстолкновительной плазме частицы ускоряются и теряют свою энергию за счет взаимодействия с электромагнитными волнами. Возможные механизмы ускорения электронов в магнитосфере Земли основаны на взаимодействии электронов с УНЧ и (или), ОНЧ электромагнитными волнами. Радиальная диффузия может быть связана с резонансными взаимодействиями электронов с УНЧ (Pc4-5) волнами. Энергия электронов увеличивается по мере того, как электроны движутся в область более сильного магнитного поля при нарушении третьего адиабатического инварианта. УНЧ волны в диапазоне частот Pc5 (1-7 мГц) могут ускорять электроны за счет дрейфового резонанса [O'Brein et al., 2003]. Во внутренней магнитосфере энергичные электроны могут дополнительно локально ускоряться за счет резонансного взаимодействия с хоровыми ОНЧ излучениями [Thorne et al., 2013]. Хоры имеют специфические свойства, которые делают взаимодействие эффективным: резонанс возникает в довольно узкой полосе частот и обычно наблюдается при

распространении от магнитного экватора, где генерируется волны. Волновые механизмы ускорения требуют затравочных электронов (с энергиями $> 50\text{-}100$ кэВ), которые ускоряются во время суббури.

Тверской [1997], а позже [Antonova, 2006; Antonova and Stepanova, 2015] предложили механизм энергизации внешнего радиационного пояса, основанный на забросе затравочных электронов в область со слабым магнитным полем, возникающим при развитии кольцевого тока, и их последующем бетатронном ускорении при восстановлении магнитного поля магнитосферы. Предложенный механизм хорошо объяснял взаимосвязь между положением максимума радиационного пояса и максимумом вариации Dst во время бури [Tverskaya, 2005, 2011].

В данной работе рассмотрен вклад трех вышеуказанных механизмов (УНЧ механизм, ОНЧ механизм, бетатронный механизм) в ускорение электронов до релятивистских энергий на примере магнитной бури 27-29 мая 2017 года и предшествующего интервала без магнитной бури.

2. Используемые данные

Регистрация потоков электронов проводилась по данным японского спутника Arase (ERG) и геостационарных спутников GOES в широком диапазоне энергий (от десятков кэВ до нескольких МэВ). Для анализа потоков электронов мы используем приборы XEP-e (датчик электронов сверхвысоких энергий, 0,4-20 МэВ) и MEP-e (датчик частиц средних энергий – электронов, 7-87 кэВ) на спутнике Arase. Мы использовали данные геосинхронных спутников GOES-13,-15 о потоках электронов с различными энергиями (40, 75, 475 кэВ, $> 0,8$, > 2 МэВ).

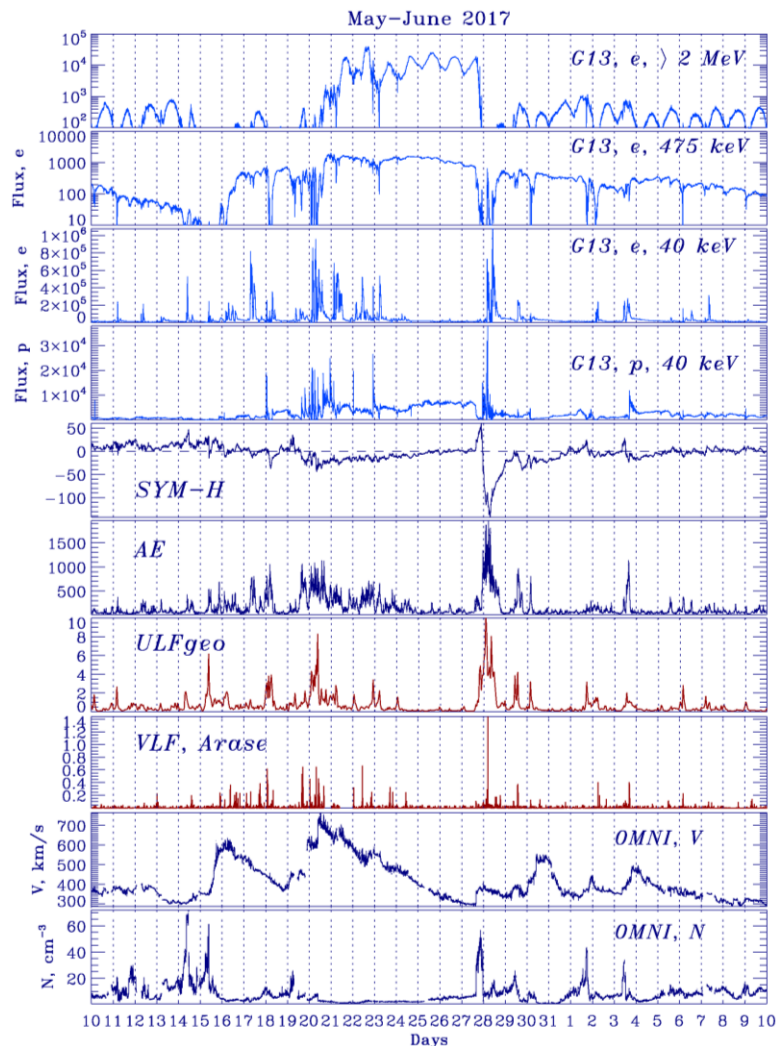


Рисунок 1. Вариации потоков электронов на спутнике GOES-15 ($E > 2$ МэВ, $E = 475$ кэВ, $E = 40$ кэВ), SYM-H индекс, AE индекс, УНЧ (ULF) индекс, интенсивность ОНЧ (VLF) излучения по данным спутника Arase (PWE инструмент), скорость солнечного ветра, плотность солнечного ветра по данным базы OMNI 10 мая – 10 сентября 2017 года.

Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) взяты из базы данных OMNI. Имеющиеся геомагнитные индексы SYM-H и AE характеризуют интенсивность магнитной бури и активность

суббури. Для количественной оценки глобальной волновой активности в диапазоне Pc5 (2-7 мГц) мы используем УНЧ индекс [Pilipenko et al., 2017]. Этот индекс рассчитывается на основе данных мировой базы магнитометров на земной поверхности и является показателем интенсивности крупномасштабных волн в магнитосфере.

В качестве показателя активности ОНЧ в магнитосфере мы использовали прибор PWE (эксперимент с плазменными волнами) на спутнике Arase. Мы суммировали интенсивность ОНЧ-волн в диапазоне частот 0,7-4,54 кГц для описания хоровой волновой активности в магнитосфере.

3. События в мае-июне 2017 года

Нами выделено два временных интервала: период с высокой скоростью солнечного ветра без геомагнитной бури (15–26 мая 2017 г.) и в условиях геомагнитной бури (27 мая–2 июня 2017 г.) – рис. 1. В первом интервале скорость солнечного ветра достигает значения около 760 км/с по данным OMNI, индекс SYM-H равен около -30 нТл. Во втором интервале скорость солнечного ветра изменяется от 400 до 550 км/с, минимальный индекс SYM-H равен -142 нТл.

В начале геомагнитной бури наблюдался сильный скачок плотности солнечного ветра до 65 см^{-3} . Во время геомагнитной бури Vz-компонента ММП была отрицательной в течение примерно 20 часов и имела значения -22 нТл, происходило интенсивное проникновение энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы. На интервале высокоскоростного потока Vz-компонента ММП изменила знак с отрицательного на положительный.

По данным спутника GOES-13 уровень потоков релятивистских электронов в интервале высоких скоростей солнечного ветра ($>10^4 \text{ e}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})$) был больше, чем во время сильной геомагнитной бури ($<10^4 \text{ e}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})$). Резкий рост 40 кэВ («затравочных») электронов происходит одновременно с увеличением индекса АЕ, характеризующего суббуревую активность. Видно, что потоки релятивистских электронов начинают расти через несколько дней после роста электронов с энергиями 40 и 475 кэВ.

Рост АЕ индекса в целом совпадает во времени с ростом УНЧ- и ОНЧ активности в магнитосфере (рис. 2.).

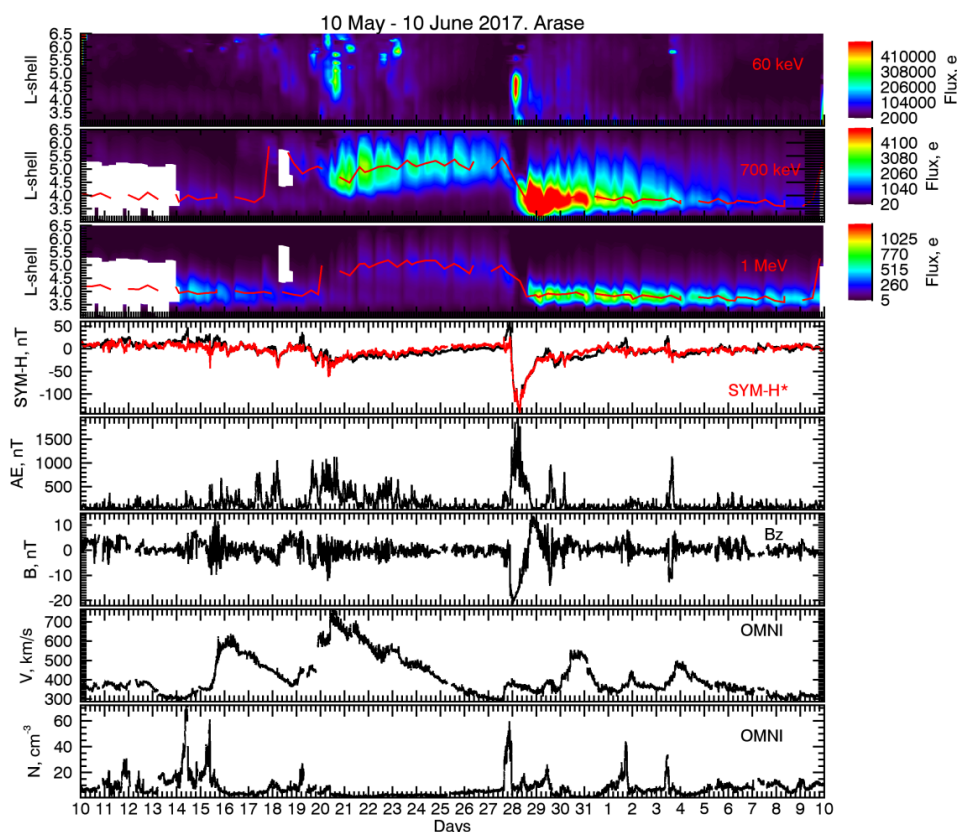


Рисунок 2. Вариации потоков электронов с энергией по данным спутника Arase, SYM-H индекс, SYM-H* индекс, АЕ-индекс, Vz-компонента ММП, скорость солнечного ветра, плотность солнечного ветра по данным базы OMNI. Красная линия на второй и третьей панелях - положение максимума потока электронов.

Чтобы показать, как меняются потоки электронов внешнего радиационного пояса в зависимости от L-оболочки, мы используем данные спутника Arase (рис. 2). Орбита спутника Arase с 10 мая по 10 июня 2017 г.

лежит в полуночном и утреннем секторе (не показано). Рост кэВ-ых электронов начинается на более высоких L-оболочках, чем рост МэВ-ых электронов. Уровень потоков релятивистских электронов (1 МэВ) во время геомагнитной бури значительно выше, чем в период без бури в отличие от данных спутников GOES [Belakhovsky et al., 2016]. По данным Arase максимум релятивистских потоков электронов смещается во время геомагнитной бури ($L \approx 5$) на меньшую L-оболочку по сравнению с периодом без магнитной бури ($L \approx 3,5-4$).

Таким образом, анализ показывает, что увеличение УНЧ и ОНЧ активности в магнитосфере происходит практически одновременно, данные волновые возмущения вносят свой вклад в ускорение электронов на начальной фазе. Затем уровень потоков релятивистских электронов держится в течение примерно десяти дней, при этом не происходит повышения УНЧ/ОНЧ активности, способной ускорять электроны. После начальной фазы ускорения электронов восстанавливающегося геомагнитное поле также может ускорять электроны за счет бетатронного механизма. В буревой период восстановление геомагнитного поля значительно больше, чем в небуревой период. Кроме того, как видно из рисунка 2, уровень релятивистских электронов во время магнитной бури существенно выше, чем в небуревой период. Однако и значение AE индекса во время интервала с магнитной бурей ($AE \approx 1900$ нТл) также заметно больше, чем для интервала без бури ($AE \approx 1000$ нТл).

5. Выводы

В работе сравнивались потоки релятивистских электронов для интервала во время геомагнитной бури 27–29 мая 2017 года и без нее. Значения потоков релятивистских электронов во время бури (при средней скорости солнечного ветра) больше, чем для интервала без магнитной бури при высокой скорости солнечного ветра. Необходимым условием увеличения потоков релятивистских электронов является рост AE индекса.

Анализ показывает, что рост ОНЧ- и УНЧ волновой активности происходит примерно в одно и то же время (за 1-3 дня до роста релятивистских электронов) и совпадает с ростом суббуревой активности. Рост УНЧ/ОНЧ активности может ускорять электроны на начальной фазе. Затем бетатронный механизм за счет восстанавливающегося геомагнитного поля может дать дополнительную энергию электронам.

Во время магнитной бури максимум интенсивности потока смещается ближе к Земле на меньшие L-оболочки по сравнению с интервалами без бури. Его положение хорошо соответствует кривой Тверской, и может эффективно работать механизм ускорения, связанный с инжекцией электронов в область ослабленного кольцевым током магнитного поля и последующим их бетатронным ускорением при восстановлении магнитного поля.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-77-10018 (Белаховский В.Б.). Научные данные спутника ERG (Arase) были получены из Научного центра ERG, управляемого ISAS/JAXA и ISEE/Университетом Нагоя (<https://ergsc.isee.nagoyau.ac.jp/index.shtml.en>). Авторы выражают благодарность за возможность использования данных спутников GOES.

Литература

1. Antonova E.E. Stability of the magnetospheric plasma pressure distribution and magnetospheric storms // *Adv. Space Res.*, 38, 1626–1630. doi:10.1016/j.asr.2005.05.005. 2006.
2. Antonova E.E., Stepanova M.V. The problem of the acceleration of electrons of the outer radiation belt and magnetospheric substorms // *Earth, Planets and Space*. 67:148, doi:10.1186/s40623-015-0319-7. 2015.
3. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Samsonov S.N. Acceleration of the electrons to the relativistic energies at the outer radiation belt during magnetic storms and without it // *Proceedings of the 11th Intl School and Conference "Problems of Geocosmos"* (Oct 03-07, 2016, St. Petersburg, Russia), 192-198, 2016.
4. O'Brien T.P., Lorentzen K.R., Mann I.R., Meredith N.P. et al. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual ULF and VLF acceleration // *J. Geophys. Res.*, 108, 1329, doi:10.1029/2002JA009784. 2003.
5. Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen, J. Statistical relationships between satellite anomalies at geostationary orbit and high-energy particles // *Adv. Space Res.*, 37, 1192–1205. 2006.
6. Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Engebretson M.J., Soloviev A.A. ULF wave power index for space weather and geophysical applications: A review // *Russian journal of Earth sciences*, vol. 17, ES2002, doi:10.2205/2017ES000597, 2017.
7. Thorne R.M., Li W. et al. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus // *Nature*, 504, 411. 2013.
8. Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N., Reizman S. Ya., Rubinstein I.A., Sosnovets E.N., Veden'kin N.N. Storm-time formation of a relativistic electron belt and some relevant phenomena in other magnetosphere plasma domains // *Adv Space Res*, 36:2392–2400. doi:10.1016/j.asr.2003.09.071. 2005.
9. Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*, Т. 51, № 1, С. 8–24. doi:10.1134/S0016793211010142. 2011.
10. Тверской Б.А. Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрономия*, Т. 37, № 5, С. 555–559. 1997.