

# УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ ВО ВНЕШНЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ЗА СЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МГД КОЛЕБАНИЯМИ Pc5 ДИАПАЗОНА

В.Б. Белаховский<sup>1</sup>, В.А. Пилипенко<sup>1</sup>, С.Н. Самсонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт космических исследований и аэронавтики, г. Якутск

**Аннотация.** С использованием данных по магнитному полю и потокам заряженных частиц с геостационарных спутников *GOES* детально исследовано ускорение электронов во внешнем радиационном поясе Земли с энергий от порядка 40 кэВ до энергий  $> 2$  МэВ. Для характеристики волновой активности магнитосферы в *Pc5* диапазоне (1-7 мГц) использован ULF индекс. Возрастание величины потоков МэВ электронов происходит более чем на 1.5 порядка через 1-2 дня после роста ULF индекса и роста потоков кэВ электронов. Показано, что величина роста потоков электронов не зависит от интенсивности геомагнитной бури и может происходить без геомагнитной бури. При этом обнаружена связь величины потока МэВ электронов со скоростью солнечного ветра, наличием скачков в плотности солнечного ветра. В период роста ULF индекса происходит рост AE индекса. По-видимому, наличие "затравочных" электронов (50-100 кэВ), инжектируемых при суббуре, является необходимым условием появления релятивистских электронов. Корреляция между периодами с высокой скоростью солнечного ветра и ростом потоков релятивистских электронов с задержкой в 1-2 дня подтверждает идею об ускорении электронов до релятивистских энергий за счет дрейфового резонанса с МГД колебаниями *Pc5* диапазона.

## 1. Введение

Динамика *Pc3-5* волн в магнитосфере Земли тесно связана с динамикой частиц. Наблюдаются различные виды взаимосвязей между ними: возбуждение колебаний в результате развития неустойчивостей энергичных частиц, модуляция захваченных и высыпающихся потоков частиц магнитосферными МГД волнами, ускорение группы частиц МГД турбулентностью. Одна из наиболее актуальных проблем космической физики – определение механизма ускорения электронов до релятивистских энергий во время магнитных бурь. Электроны релятивистских энергий могут выводиться из строя аппаратуру на спутниках, что может приводить даже к потере спутника. Поэтому в литературе их часто называют "электроны-убийцы" (killer-electrons). Внешний радиационный пояс является динамическим образованием – интенсивность потоков высокоэнергичных электронов ( $10^5$ - $10^7$  эВ) может резко возрастать и спадать на 1-3 порядка [Tverskaya et al., 1996]. Резкие возрастания и спады потоков релятивистских электронов регистрируются в широком диапазоне расстояний (от  $L=3$  до  $L=7$ ). Представление о происхождении электронов с энергией  $\sim 100$  кэВ связано с адиабатическим ускорением при переносе в область более сильного поля (бетатронное ускорение).

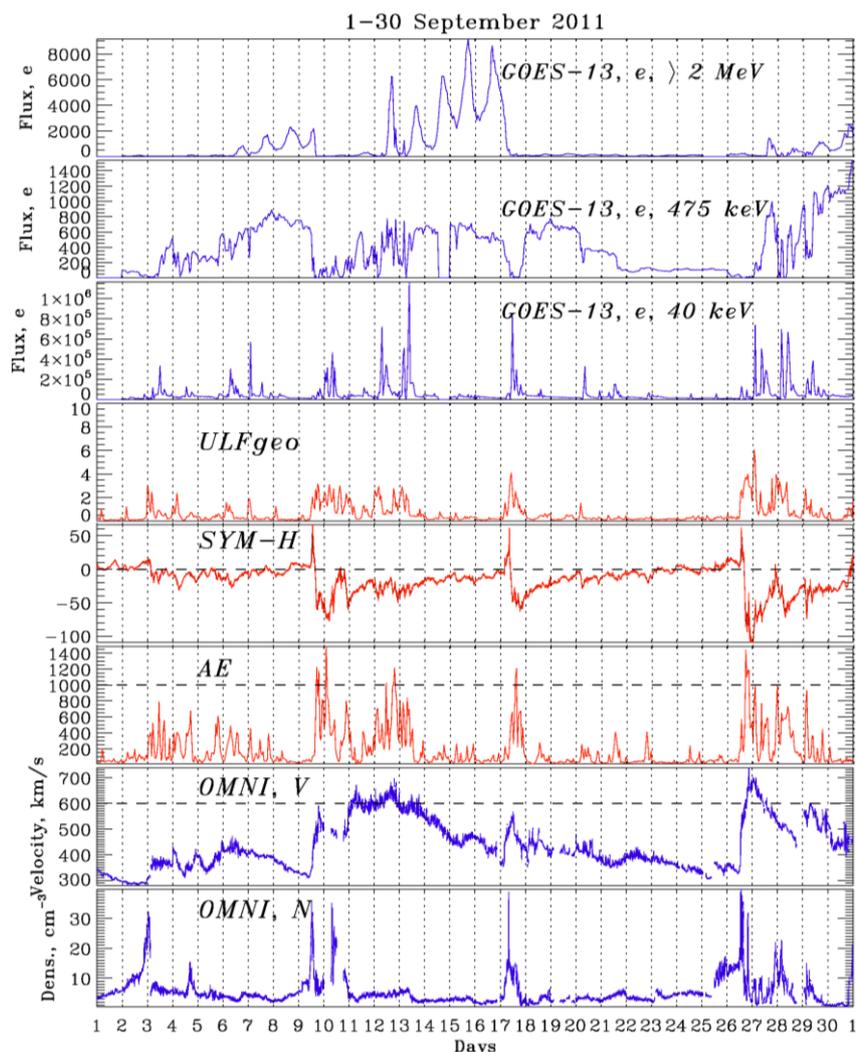
В бесстолкновительной магнитосферной плазме ускорение заряженных частиц преимущественно связано с взаимодействием волн и частиц. Один из популярных механизмов основан на идее ускорения и радиальной диффузии частиц при дрейфовом резонансе с *Pc5* волнами. Согласно этому сценарию, *Pc5* пульсации, возбуждаемые потоками солнечного ветра или протонами кольцевого тока, являются промежуточным агентом, передающим энергию от протонов солнечной плазмы или кольцевого тока ускоренным электронам. Предложенные к настоящему времени модели ускорения электронов неявно основаны на предположении, что волновая накачка энергии осуществляется волнами с параметрами типичных *Pc5* пульсаций, в частности с  $m=1-2$  [Elkington et al., 1999] или  $m=0$  [Liu et al., 1999]. Геосинхротронный механизм широко используют для интерпретации ускорения геомагнитными пульсациями релятивистских электронов во время магнитных бурь [Pilipenko et al., 2006].

В данной работе рассмотрены вариации потоков электронов различных энергий на геостационарной орбите за периоды в один месяц для экспериментального доказательства возможности ускорения электронов до релятивистских энергий МГД колебаниями *Pc5* диапазона.

## 2. Данные

В работе использовались данные по потокам электронов (40, 75, 475 кэВ,  $> 0.8$  МэВ,  $> 2$  МэВ) и вариациям геомагнитного поля с геостационарных спутников *GOES-13*, *GOES-15*. Параметры солнечного ветра брались из базы OMNI. Для характеристики волновой активности магнитосферы в *Pc5* частотном диапазоне (1-7 мГц) использовался ULF индекс, разработанный в Институте Физики Земли РАН [Kozyreva et al., 2007]. ULF индекс считается как по данным спутников *GOES*, так и по наземным магнитным данным. Был использован

SYM-H индекса для характеристики буревой активности и AE индекс для характеристики суббуревой активности.



**Рисунок 1.** Вариации потоков электронов на спутнике *GOES-13* (>2 МэВ, 475 кэВ, 40 кэВ), ULF индекс по данным спутников *GOES*, SYM-H индекс, AE индекс, скорость V и плотность N солнечного ветра по данным базы OMNI для сентября 2011 года.

МэВ) и кэВ электронов (40 кэВ). Значительный рост потоков релятивистских электронов наблюдался на восстановительной фазе магнитной бури 9-14 сентября 2011 (SYM-H = -80 нТл), причем наибольший рост наблюдался уже после окончания бури. Величина потока МэВ электронов возросла более чем на 1.5 порядка. Видно, что последовательно происходит рост кэВ электронов, субрелятивистских электронов и затем релятивистских электронов. Возрастание МэВ электронов происходит через несколько дней после роста кэВ электронов и роста ULF индекса. Во время SC события 9 сентября 2011 интенсивность МэВ электронов резко уменьшается. Это связано со сжатием магнитосферы и переносом потоков МэВ электронов за геостационарную орбиту вглубь магнитосферы (так называемый “Dst эффект”). Это падение адиабатическое, и потом поток восстанавливается, когда магнитосфера релаксирует к прежнему состоянию. В нашем случае после восстановления поток оказывается больше, чем был перед бурей. Это превышением над адиабатическим уровнем и есть результат ускорения.

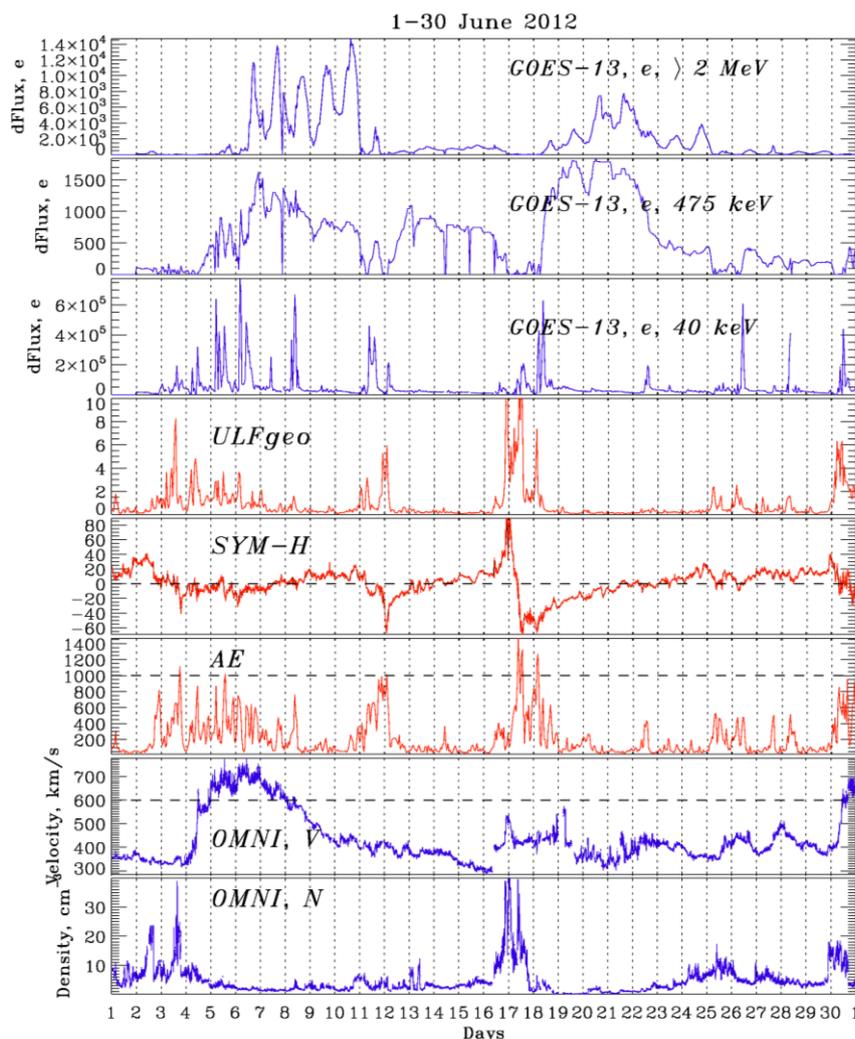
Для сравнения интенсивность другой геомагнитной бури, 26-30 сентября, была выше (SYM-H = -110 нТл), но значения потоков МэВ электронов были заметно меньше. А для слабой геомагнитной бури 17-18 сентября (SYM = -77 нТл) рост потоков МэВ электронов практически был мало заметен.

### 3. Анализ наблюдений

В работе проводилось сравнение ULF индекса с вариациями потоков электронов различных энергий (затравочных – 40 кэВ, субрелятивистских – 475 кэВ, релятивистских – >2 МэВ) по данным спутников *GOES*. Было исследовано возрастание потоков релятивистских электронов как во время геомагнитных бурь, так и в периоды без геомагнитной бури, когда наблюдалась высокая скорость солнечного ветра (более 600 км/с). Наличие геомагнитной бури определялось по вариациям SYM-H индекса.

Оценки для рассмотренных случаев показывают, что вариации ULF индекса по данным *GOES* хорошо коррелируют с фильтрованными вариациями наземного геомагнитного поля для станций из разных секторов MLT ( $\Phi=65-66$  градусов): NAQ, TIX, GILL, KIAN, LOZ.

На рис. 1 показаны вариации потоков электронов на спутнике *GOES-13*, индексы геомагнитной активности (ULF, SYM-H, AE), параметры солнечного ветра (скорость, плотность) для сентября 2011 года, когда наблюдалась серия геомагнитных бурь. Показаны потоки релятивистских электронов (> 2 МэВ), субрелятивистских электронов (0.475



**Рисунок 2.** Вариации потоков электронов на спутнике *GOES-13* ( $> 2$  МэВ, 475 кэВ, 40 кэВ), ULF индекс по данным спутников *GOES*, SYM-H индекс, AE индекс, скорость  $V$  и плотность  $N$  солнечного ветра по данным базы OMNI для июня 2012 года.

На рис. 2 показаны те же геофизические параметры, что и на рис. 1, но для июня 2012 года. Рассмотрен период 4-9 июня, когда скорость солнечного ветра была высока и достигала 770 км/с, при этом геомагнитной бури не наблюдалось. Наличие скачков в плотности солнечного ветра, высокая скорость солнечного ветра приводят к росту ULF индекса. Поток МэВ электронов достигал значения  $1.4 \cdot 10^2$  Кл/(см<sup>2</sup>·с·ср). Интересно, что в период последующей геомагнитной бури 16-20 июня 2012 (SYM-H = -70 нТл) поток МэВ электронов достигал заметно меньшего значения  $7 \cdot 10^3$  Кл/(см<sup>2</sup>·с·ср). То есть прослеживается корреляция интенсивности потоков релятивистских электронов со скоростью солнечного ветра, а не с интенсивностью геомагнитной бури.

Для обоих месяцев наблюдается суточный ход в вариациях релятивистских и субрелятивистских электронов. Было исключено влияние суточного хода путем усреднения по суткам (не показано). В целом тенденция роста МэВ электронов для суточных и часовых данных совпадают.

Для обоих рассмотренных месяцев в период роста ULF индекса происходит рост AE индекса. По-видимому, наличие “затравочных” электронов (50-100 кэВ), инжектируемых при суббуре, является необходимым условием появления релятивистских электронов в магнитосфере.

#### 4. Обсуждение

В ходе проведенного исследования показано, что возрастание потоков релятивистских электронов (с энергией от 1 до нескольких МэВ) на 1.5-2 порядка происходит после периодов с высокой скоростью солнечного ветра, при наличии заметных скачков в плотности солнечного ветра и не зависит от интенсивности геомагнитной бури. Ускорение электронов до релятивистских электронов происходит через 1-2 дня после появления МГД возмущений  $Pc5$  диапазона.

Один из возможных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий основан на идее «геосинхротрона» – ускорения и радиальной диффузии частиц при дрейфовом резонансе электронов с Pc5 волнами:  $\omega - m \cdot \omega_d = 0$ , где  $m$  – азимутальное волновое число,  $\omega_d$  – дрейфовая частота электронов,  $\omega$  – частота волны. Согласно этому сценарию, Pc5 пульсации, возбуждаемые потоками солнечного ветра или протонами кольцевого тока, являются промежуточным агентом, передающим энергию от протонов солнечной плазмы или кольцевого тока ускоренным электронам. При этом резонанс происходит, как правило, с Pc5 пульсациями тороидальной поляризации, поскольку для них характерны небольшие азимутальные волновые числа  $m$ . Эти волны хорошо видны на Земле.

Один из основных механизмов для возбуждения тороидальных геомагнитных Pc5 пульсаций в магнитосфере – неустойчивость Кельвина-Гемгольца на магнитопаузе, возникающая при высокой скорости солнечного ветра. Далее быстрая магнитозвуковая волна при распространении вглубь магнитосферы вступает в резонанс с силовыми линиями геомагнитного поля (field line resonance, FLR) [Kivelson & Pu, 1984]. Также тороидальные геомагнитные Pc5 пульсации возбуждаются при заметных скачках в плотности солнечного ветра [Nopper et al., 1982]. Рассмотренные события демонстрируют корреляцию между периодами с высокой скоростью солнечного ветра, периодами со скачками в плотности и ростом потоков релятивистских электронов с задержкой в 1-2 дня. Столько длительная задержка связана с тем, что радиальная диффузия электронов является достаточно медленным процессом.

Проведенные наблюдения подтверждают точку зрения, согласно которой МГД колебания Pc5 диапазона способствуют ускорению электронов до релятивистских энергий во внешнем радиационном поясе Земли.

## 5. Выводы

Таким образом, приведенные наблюдения демонстрируют корреляцию между периодами с высокой скоростью солнечного ветра и ростом потоков релятивистских электронов с задержкой примерно в 1-2 дня, что подтверждает идею об ускорении электронов до МэВ энергий за счет дрейфового резонанса с МГД колебаниями Pc5 диапазона. Величина роста потоков МэВ электронов не зависит от интенсивности геомагнитной бури и может происходить без геомагнитной бури. При этом необходимым условием ускорения электронов до релятивистских энергий является наличие инжекции заряженных частиц при суббуре.

**Благодарности.** Работа поддержана грантом РФФИ мол\_а\_дк № 16-35-60049, грантом РФФИ р\_восток\_а №15-45-05108. Выражаем благодарность сайту <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> за предоставленные данные спутников GOES.

## Литература

- Elkington S.R., M.K. Hudson, A.A. Chan. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc5 ULF oscillations // *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3273-3276, 1999.
- Kozyreva O., Pilipenko V., Engebretson M. J., Yumoto K., Watermann J., Romanova N. In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons // *Planetary and Space Science*. Vol. 55. Is. 6. p. 755-769. 2007.
- Kivelson M.G., Pu Z.Y., The Kelvin-Helmholtz instability on the magnetopause // *Planet. Space Sci.*, vol. 32, №11, P. 1335, 1984.
- Liu W.W., Rostoker G., Baker D. N. Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF pulsations // *Journal of Geophys. Res.* Vol. 104. A8. p. 17391-17408. 1999.
- Nopper R.W., W.J. Hughes, MacLennan C.G., McPherron R.L. Impulse-excited pulsations during the July 29, 1977, event // *J. Geophys. Res.*, vol. 87, A8, P. 5911, 1982.
- Potapov A., A. Guglielmi, B. Tsegmed, J. Kultima. Global Pc5 event during 29-31 October 2003 magnetic storm // *Adv. Space Res.* vol. 38. №8. P. 1582-1586. 2006.
- Pilipenko V., N. Yagova, N. Romanova, J. Allen. Statistical relationships between satellite anomalies at 3 geostationary orbit and high-energy particles // *Adv. in Space Res.* vol. 37. №6. P. 1192-1205. 2006.
- Tverskaya L. V. Dynamics of Energetic Electrons in the Radiation Belts // *Radiation Belts: Models and Standards. Geophysical Monograph 97. American Geophysical Union.* p.183. 1996.