

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.010

## ВКЛАД УНЧ И ОНЧ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В РОСТ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

В.Б. Белуховский<sup>1</sup>, В.А. Пилипенко<sup>2</sup>, Е. Миоши<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония

**Аннотация.** В работе исследован вклад УНЧ и ОНЧ волновых возмущений в ускорение электронов до релятивистских энергий (несколько МэВ) во внешнем радиационном поясе Земли. Регистрация потоков электронов осуществлялась по данным геостационарных спутников GOES, японского спутника Arase (ERG), запущенного в конце 2016 года, спутника RBSP. Для характеристики ОНЧ волновой активности в магнитосфере использованы данные спутников Arase, RBSP. Анализ показал, что наземная регистрация ОНЧ волн не может быть надежным индикатором увеличения мощности ОНЧ волн в магнитосфере вследствие их затухания в ионосфере. Использован УНЧ индекс для характеристики волновой активности магнитосферы в Pc5 диапазоне. Необходимым условием ускорения электронов до релятивистских энергий является длительная суббуревая активность, сопровождающаяся инжекцией "затравочных" электронов (50-100 кэВ). Корреляция роста потоков релятивистских электронов с высокой скоростью солнечного ветра подтверждает важную роль дрейфового резонанса магнитосферных электронов с МГД колебаниями Pc5 диапазона. Анализ показывает, что рост потоков релятивистских электронов на 1.5-2 порядка происходит через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, а также мощности ОНЧ волн. То есть вклад данных механизмов преобладает на начальной стадии ускорения электронов. Синергетическое влияние мощности УНЧ и ОНЧ излучений на потоки релятивистских электронов выше, чем сумма отдельных вкладов этих факторов.

**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 выводить 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 возрасти и упасть на 1-3 порядка [Tverskaya et al., 1996; Reeves et al., 2003]. Резкие возрастания и спады потоков релятивистских электронов регистрируются в широком диапазоне расстояний (от  $L=3$  до  $L=7$ ).

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  $\omega - m\omega_d = 0$  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].

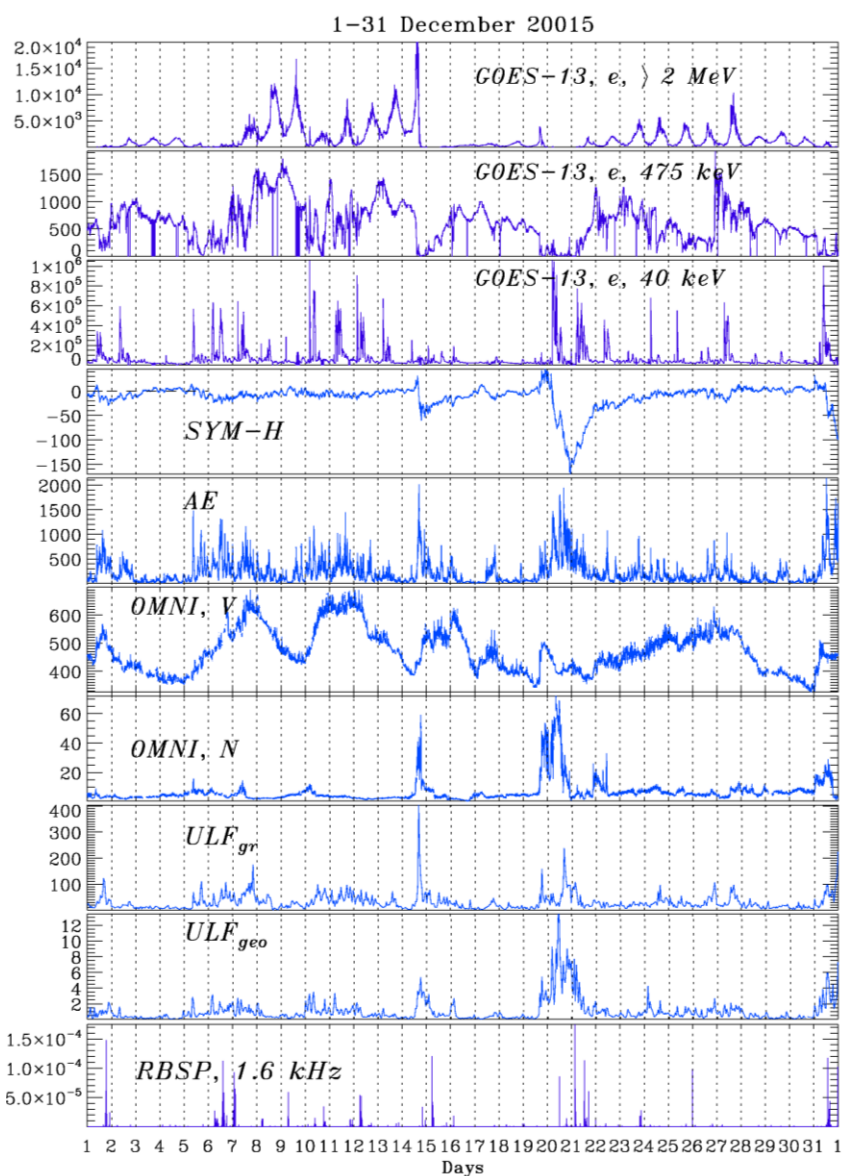
В других работах рассматривается возможность ускорения электронов в результате резонансного взаимодействия с ОНЧ волнами [Horne et al., 2005]. Считается, что наиболее эффективно способны ускорять электроны "хоры", поскольку они наблюдаются в узкой частотной полосе и распространяются от экватора, где они возбуждаются. В работе [Thorne et al., 2013] с использованием данных спутника RBSP отмечается, что механизм ускорения за счет ОНЧ волн эффективен на более низких L-оболочках, то есть внутри геостационарной орбиты.

Причины появления во внешнем радиационном поясе электронов, имеющих релятивистскую энергию, пока окончательно не объяснены. Основные вопросы в решении такой задачи – определение источника

первичных частиц, которые затем ускоряются, и выявление механизма (или механизмов) ускорения до таких больших энергий.

**2. Данные.** Регистрация потоков электронов в диапазоне энергий от 50 кэВ до > 2 МэВ осуществлялась по данным геостационарных спутников GOES. Для характеристики ОНЧ волновой активности в магнитосфере использованы данные японского спутника ERG, данные спутников RBSP. Анализ показал, что наземная регистрация ОНЧ волн не может быть надежным индикатором увеличения мощности ОНЧ волн в магнитосфере вследствие их затухания в ионосфере. Использован УНЧ индекс для характеристики волновой активности магнитосферы в Pc5 диапазоне. Рассмотрены интервалы как с магнитными бурями, так и без них.

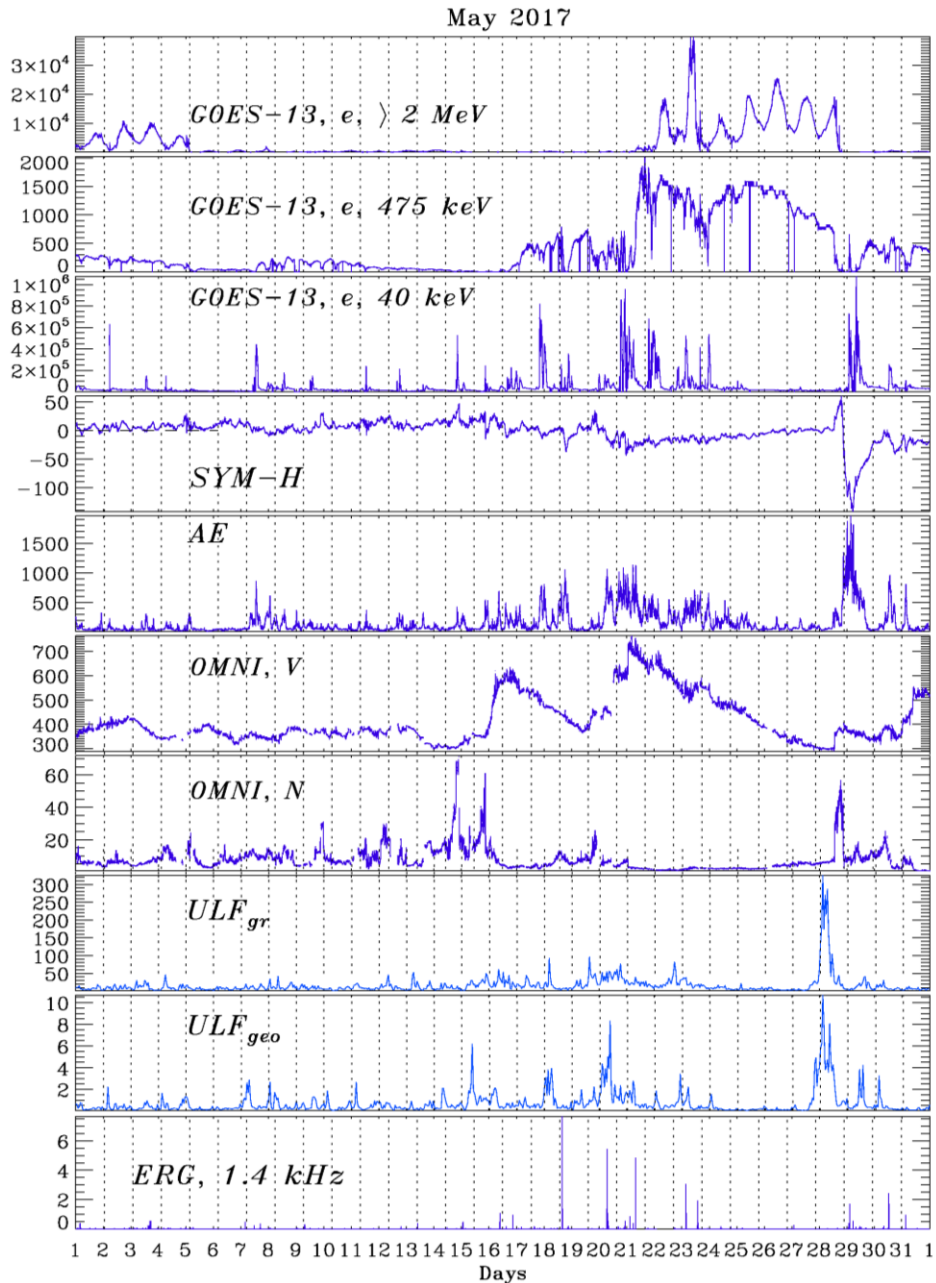
**3. Наблюдения.** На рис. 1, 2 представлены вариации потоков электронов с энергиями 40 кэВ, 475 кэВ, > 2 МэВ по данным спутника GOES-13 событий в декабре 2015 года, мае 2017 года. Для всех рассмотренных событий рост потоков МэВ электронов сопровождался ростом АЕ индекса. Поэтому необходимым условием ускорения электронов до релятивистских энергий является длительная суббуревая активность, сопровождающаяся инъекцией “затравочных” электронов (50-100 кэВ).



**Рисунок 1.** Потоки электронов с энергиями > 2 МэВ, 475 кэВ, 40 кэВ по данным спутника GOES-13; SYM-H индекс, АЕ-индекс; скорость V, плотность N солнечного ветра по данным базы OMNI; наземный ULF индекс и магнитосферный ULF индекс, мощность ОНЧ излучений на частоте 1.6 кГц по данным спутника RBSP-A для декабря 2015 года.

Обнаружено, что возрастание потоков релятивистских электронов происходит после периодов с высокой скоростью солнечного ветра. При этом величина роста МэВ электронов не зависит от интенсивности геомагнитной бури и может происходить без бури. Например, из рис. 1 видно, что интенсивность магнитной бури 20-23 декабря 2015 года составляла  $SYM-H = -170$  нТл. При этом значения потоков релятивистских электронов были меньше, чем для интервала без бури (7-14 декабря 2015 года).

Корреляция между периодами с высокой скоростью солнечного ветра и ростом потоков релятивистских электронов с задержкой в 1-3 дня подтверждает идею о важной роли дрейфового резонанса магнитосферных электронов с МГД колебаниями Pc5 диапазона. Наличие высокой скорости солнечного ветра является причиной для возбуждения тороидальных МГД волн Pc5 диапазона в магнитосфере за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на магнитопаузе. Повышение мощности УНЧ колебаний стимулируют радиальную диффузию заправочных электронов с периферии магнитосферу на внутренние магнитные оболочки.



**Рисунок 2.** Потоки электронов с энергиями  $> 2$  МэВ, 475 кэВ, 40 кэВ по данным спутника GOES-13; SYM-H индекс, AE-индекс; скорость V, плотность N солнечного ветра по данным базы OMNI; наземный ULF индекс и магнитосферный ULF индекс, мощность ОНЧ излучений на частоте 1.4 кГц по данным спутника ERG для мая 2017 года.

Анализ показывает, что рост потоков релятивистских электронов (с энергией более 2 МэВ) на 1.5-2 порядка происходит через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, а также мощности ОНЧ волн на спутнике RBSP (рис. 1), на спутнике ERG (рис. 2). То есть вклад данных механизмов преобладает на начальной стадии ускорения электронов. Синергетическое влияние мощности УНЧ и ОНЧ излучений на потоки релятивистских электронов выше, чем сумма отдельных вкладов этих факторов.

**Выводы.** Показано, что заметный рост УНЧ индекса и ОНЧ возмущений в магнитосфере происходит за 1-2 дня до начала роста интенсивности релятивистских электронов, то есть на начальной стадии их ускорения. Синергетическое влияние мощности УНЧ и ОНЧ излучений на потоки релятивистских электронов выше, чем сумма отдельных вкладов этих факторов. Необходимыми условиями ускорения электронов до релятивистских энергий является длительная суббуревая активность, сопровождающаяся инжекцией заряженных частиц, высокая скорость солнечного ветра. Корреляция между периодами с высокой скоростью солнечного ветра и ростом потоков релятивистских электронов с задержкой в 1-3 дня подтверждает идею о важной роли дрейфового резонанса магнитосферных электронов с МГД колебаниями Pc5 диапазона.

### Литература

- Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A.* Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc5 ULF oscillations // *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 26, p. 3273-3276, 1999.
- Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., Albert J.M., Meredith N.P., Anderson R.R.* Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus wave // *Journal of Geophys. Res.*, Vol. 110, A3, A03225, 2005.
- 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.
- 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.
- Potapov A., Guglielmi A., Tsegmed B., Kultima J.* Global Pc5 event during 29-31 October 2003 magnetic storm // *Adv. Space Res.*, Vol. 38, №8, p. 1582-1586, 2006.
- Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J.* Statistical relationships between satellite anomalies at 3 geostationary orbit and high-energy particles // *Adv. 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.
- Thorne R.M., Li W., Ni B., Ma Q., Bortnik J., Chen L., Baker D.N., Spence H.E., Reeves G.D., Henderson M.G., Kletzing C.A., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Blake J.B., Fennell J.F., Claudepierre S.G., Kanekal S.G.* Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus // *Nature*, 504, 411, 2013, doi:10.1038/nature12889