

ИРРЕГУЛЯРНЫЕ P_{i3} ПУЛЬСАЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С ПОТОКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко², С.Н. Самсонов³

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, belakhov@mail.ru

²Институт физики Земли, г. Москва

³Институт космических исследований и астрономии, г. Якутск

Аннотация. Исследованы иррегулярные пульсации P_{i3} во время повторяющихся суббурь (sawtooth events) 12.04.2011, используя спутниковые (GOES, THEMIS) и наземные (CARISMA, THEMIS, NORSTAR) наблюдения. Данные пульсации наблюдались не только во время фазы роста суббури, как обычные P_{i2} пульсации, но в течение всего периода суббуревой активности. Максимальная амплитуда пульсаций наблюдается в авроральной зоне (~66° CGL). Лучше всего пульсации выражены в X-компоненте геомагнитного поля на Земле, что соответствует азимутальной геомагнитного поля на геостационарных спутниках GOES, а также на спутниках THEMIS, которые располагались в хвосте магнитосферы на расстоянии ~ 10 Re. С началом суббурь наблюдается резкое увеличение потоков энергичных частиц по данным спутников GOES, THEMIS, увеличение выпадения электронов по данным риометрического поглощения (сеть NORSTAR) и усиление интенсивности полярных сияний по данным камер всего неба THEMIS. Данные P_{i3} иррегулярные пульсации интенсивно модулируют потоки заряженных частиц в магнитосфере, риометрическое поглощение, интенсивность полярных сияний. Мы полагаем, что рассматриваемые P_{i3} пульсации имеют иную физическую природу, чем дневные P_{c5} пульсации, занимающие тот же частотный диапазон. Предложено несколько моделей, описывающих МГД природу и механизм возбуждения P_{i3} колебаний.

1. Введение

Во время геомагнитной суббури в ночном секторе магнитосферы разыгрывается целый комплекс волновых процессов. Неотъемлемым элементом суббури являются P_{i2} пульсации (50-150 секунд). Интерес к этим пульсациям связан с тем, что они возникают при резкой активизации магнитосферной активности – начале взрывной фазы суббури (breakup), и являются “маркером”, отмечающим переход медленной фазы роста возмущения ночной магнитосферы во взрывную фазу [Pilipenko *et al.*, 2005]. Возбуждение P_{i2} пульсаций связано с интенсификацией полярных сияний, ионосферными и продольными токами, выпадением энергичных электронов и другими процессами, происходящими во время брейкапа. Помимо хорошо известных P_{i2} пульсаций на фоне суббури наблюдаются более длиннопериодные иррегулярные P_{i3} (или P_{s6}) пульсации с периодом примерно 10-20 минут и амплитудой в сотни нТл [Cheng *et al.*, 2014]. Данные колебания наблюдались как на земной поверхности, так и в магнитосфере, но механизм генерации данного типа возмущений так до конца и не выяснен.

В последнее время появляется все больше экспериментальных свидетельств в пользу такого сценария развития суббури, при котором первоначальная неустойчивость развивается в близкой к Земле области замкнутых силовых линий, а затем выведенная из равновесия магнитосферная система высвобождает основную энергию в результате пересоединения в хвосте. В некоторых из теоретических моделей альвеновские колебания силовых линий (либо с тороидальной, либо с полоидальной поперечной поляризацией) и их активное взаимодействие с ионосферой играют принципиальную роль [Rae *et al.*, 2014]. Поэтому изучение P_{i3} пульсаций, являющихся по-существу тонкой структурой суббури, приобретает особое значение. Понимание физической природы данных колебаний может лучше понять физическую природу самой суббури.

В данной работе будут исследованы длиннопериодные P_{i3} пульсации во время повторяющихся суббурь (sawtooth events) 12.04.2011 г. и их связь с потоками захваченных и выпадющих заряженных частиц.

2. Данные наблюдений

В работе использованы данные сети магнитных станций CARISMA (Рис. 1), сети риометров NORSTAR и камер всего неба THEMIS. Также использованы данные регистрации вариаций магнитного поля и потоков заряженных частиц на геостационарных спутниках GOES и спутниках THEMIS, находившихся в хвосте магнитосферы. Параметры солнечного ветра и ММП брались из базы данных OMNI. Наличие большого числа наземных и спутниковых наблюдений в изучаемом событии дает возможность более глубоко исследовать механизмы возбуждения P_{i3} пульсаций.

3. Событие 12 Апреля 2011

3.1. Геофизическая обстановка и параметры межпланетной среды. Примерно в 05 UT на станциях сети CARISMA наблюдались периодически повторяющиеся с интервалом 3-4 часа суббури с амплитудой AE индекса до 1100 нТл (рис. 2-3). Скорость солнечного ветра V в момент начала суббури составляла около 530 км/с и продолжала медленно нарастать. Плотность солнечного ветра N сильных скачков не испытывала. Повторяющиеся суббури наблюдались на фоне слабой геомагнитной бури с $Dst=-48$ нТл. По-видимому, причиной появления суббурь стала неоднократная резкая смена знака B_z -компоненты ММП (рис. 2). Начало суббурь отмечено красными линиями на вариациях AE-индекса.

С началом суббури резко возрастает величина риометрического поглощения и интенсивность полярных сияний (рис. 3).

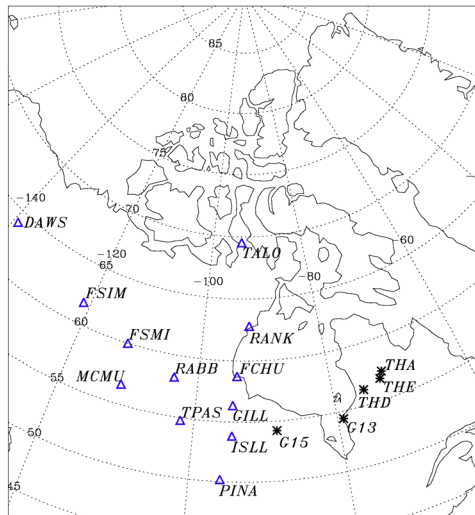


Рисунок 1. Расположение наземных станций. Звездочки показывают геомагнитные проекции спутников GOES-13,15 и THEMIS-A,E,D

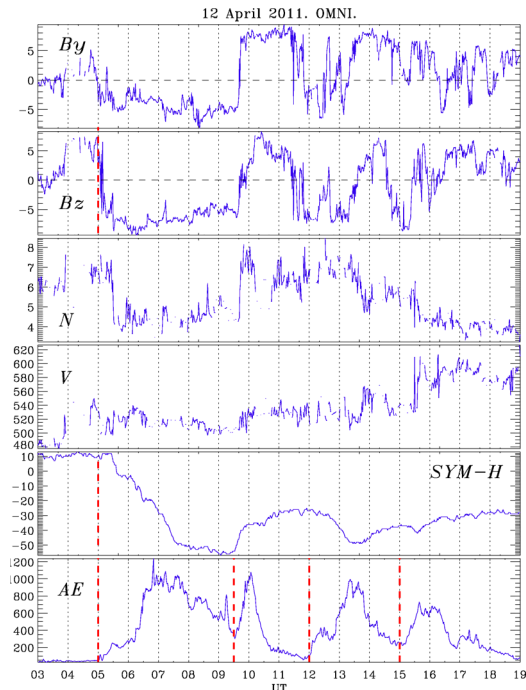


Рисунок 2. Компоненты ММП [нТл], плотность [см⁻³] и скорость [км/с] солнечного ветра, SYM-H индекс [нТл], AE-индекс [нТл]

3.2. Наземные наблюдения пульсаций. Первые две суббуревые активизации (~06 UT, ~10 UT) сопровождалась всплеском иррегулярных пульсаций с амплитудой до 200 нТл, которые можно более четко увидеть после вычитания низкочастотного тренда (рис. 3). Данный тип иррегулярных пульсаций принято относить к Pi3 (или Ps6) типу. Pi3 пульсации наблюдались в течение всего периода суббуревой активности, а не только во время взрывной фазы, как Pi2 пульсации. По мере перехода суббуревой активности в фазу восстановления (с ~11 UT) Pi3 пульсации сменились более регулярными Pc5 колебаниями. Максимум амплитуды Pi3 пульсаций наблюдается на станции GILL (~66° CGL). Вейвлет-анализ показывает, что максимум спектральной мощности в X-компоненте приходится на частоты 0.4-0.6 МГц (не показано), что соответствует периодам ~20-40 мин. Рассматриваемые колебания также хорошо видны в Y и Z-компонентах геомагнитного поля, но в этих компонентах спектральный максимум уже приходится на несколько иные частоты.

Pi3 пульсации в геомагнитном поле вызывают одновременные пульсации в риометрическом поглощении и в интенсивности полярных сияний (рис. 5), что свидетельствует о модуляции потоков высыпающихся в ионосферу энергичных и надтепловых электронов.

3.3. Наблюдения пульсаций в магнитосфере. Всплески Pi3 пульсаций и последующих Pc5 колебаний видны и в районе геостационарной орбиты на геостационарных спутниках GOES-13 (MLT=UT-5) и GOES-15 (MLT=UT-6) (рис. 5). Хотя спутники находились всего в 1 часе MLT друг от друга, корреляция между колебаниями на этих спутниках невысокая. Коэффициент корреляции магнитных вариаций по B_p компоненте, отфильтрованных в полосе периодов T около 20 мин., составляет 0.48 при временном сдвиге $\Delta t=5$ минут для интервала 07.00-10.00 UT. Если принять, что этот сдвиг соответствует распространению колебаний в азимутальном направлении между разнесенными на $\Delta\Lambda=15^\circ$ спутниками, то он соответствует характерным волновым числам $m=(\Delta t/T)(360/\Delta\Lambda)\sim 6$.

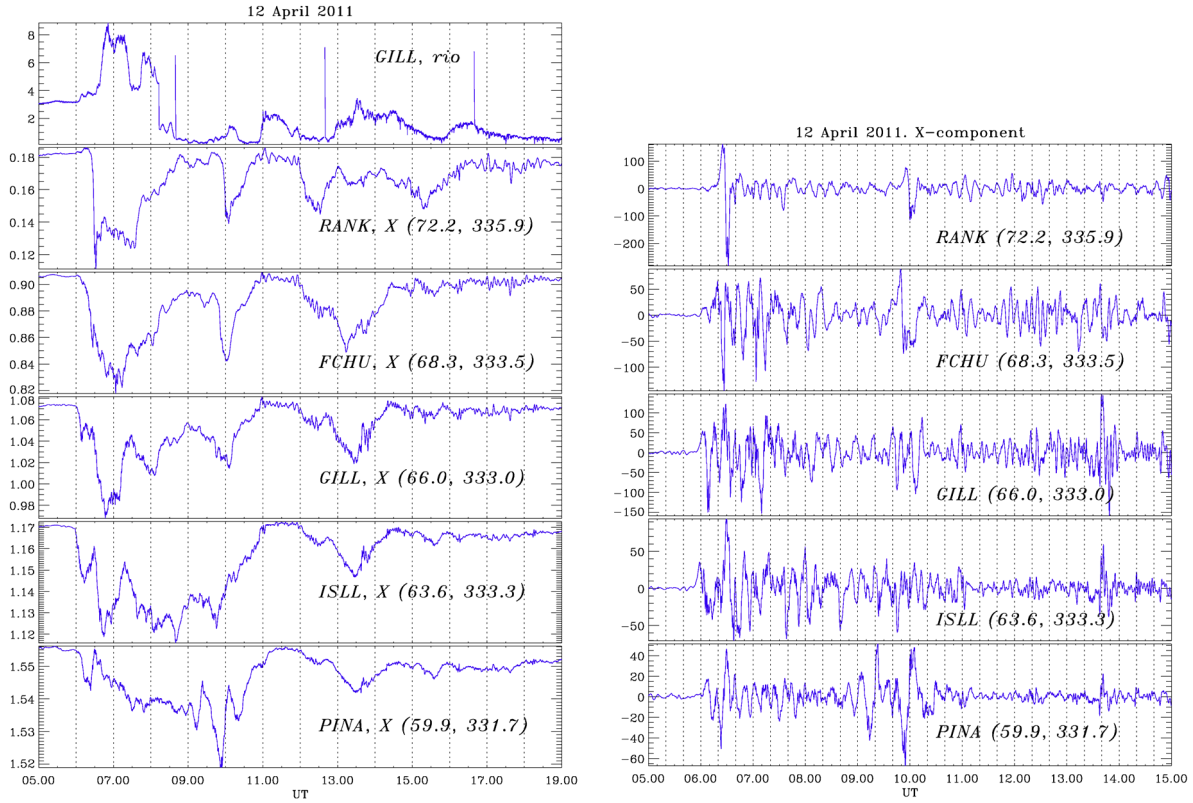


Рисунок 3. Вариации риометрического поглощения на станции GILL [дБ] и X-компоненты геомагнитного поля [нТл·10⁴] по данным меридиональной цепочки станций сети CARISMA [нТл] (слева). Вариации X-компоненты геомагнитного поля [нТл] с убраным низкочастотным трендом (справа).

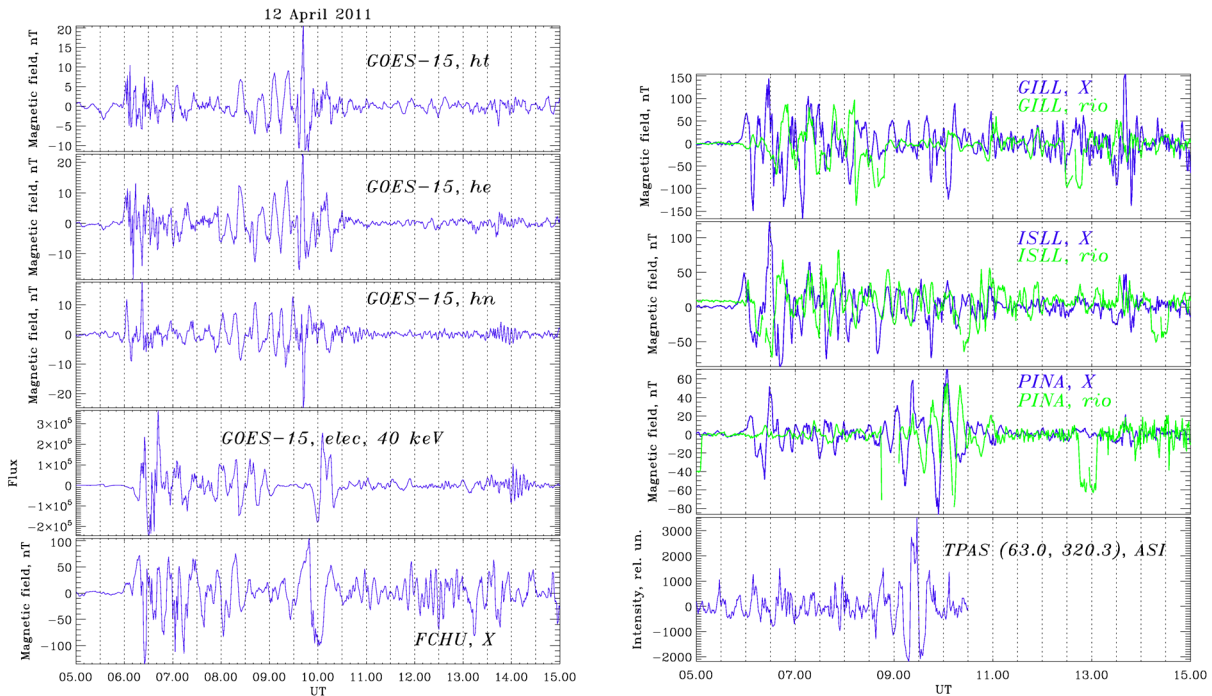


Рисунок 4. Вариации геомагнитного поля на спутнике GOES-15 с убраным низкочастотным уровнем (ht, he, hn-компоненты), вариации потоков электронов (40 кэВ) на GOES-15, X-компонента геомагнитного поля на станции FCHU.

Рисунок 5. Вариации X-компоненты геомагнитного поля и риометрического поглощения с убраными низкочастотными вариациями на станциях GILL-ISLL-PINA, интенсивность полярных сияний по данным камеры всего неба на станции TPAS.

X-компонента геомагнитного поля на станции FCHU коррелирует с азимутальной h_p -компонентой на спутнике GOES-15 (рис. 4), что говорит о повороте эллипса поляризации на $\pi/2$ при переходе через ионосферу для рассматриваемых Pi3 колебаний. Данные GOES-15 показывают наличие заметной компоненты сжатия B_t в структуре магнитного поля Pi3 пульсаций (рис. 4).

Pi3 геомагнитные колебания модулируют потоки электронов с энергией 40 кэВ в магнитосфере, как видно из данных детектора частиц спутника GOES-15 (рис. 4). Однако корреляция между Pi3 пульсациями в геомагнитном поле и потоках заряженных частиц невысокая.

Спутники THEMIS-A, D, E в момент суббури находились в хвосте магнитосферы на расстоянии около 10 Re. На спутнике THEMIS-A также видны Pi3 пульсации в геомагнитном поле и в потоках электронов с энергией 25 кэВ. Видна связь в колебаниях геомагнитного поля на спутнике THEMIS-A и GOES-13, хотя с невысокой корреляцией.

4. Обсуждение и заключение

В рассмотренном событии иррегулярные Pi3 пульсации наблюдались на фоне повторяющихся суббурь. Корреляция Pi3 пульсаций на земной поверхности и в магнитосфере невысокая. Колебания имеют заметную компоненту сжатия геомагнитного поля и способны заметно модулировать потоки захваченных и высыпавшихся энергичных электронов.

Хотя корреляция колебаний на близко расположенных спутниках GOES-13 и GOES-15 невысокая, временной сдвиг максимума кросс-корреляционной функции дает возможность оценить преобладающий азимутальный масштаб в структуре поля пульсаций, соответствующий $m \sim 6$.

Остается непонятной причина больших периодов Pi3 пульсаций (15-20 минут), намного больших, чем период резонансных альвеновских колебаний (3-10 мин) на тех же широтах, наблюдаемых как Pc5 пульсации. Изменение конфигурации силовых линий геомагнитного поля на ночной стороне магнитосферы во время сильных суббуревых возмущений (вытягивание в хвост) может привести к увеличению периодов колебаний. Столь большое уменьшение частоты ω по сравнению с характерными частотами альвеновских колебаний ω_A также можно приписать наличию сильного затухания (при котором добротность $Q \sim 1$) в системе $\omega^2 = \omega_A^2(1 - 1/2 Q^2)$ [Guido et al., 2014]. Межмодовое зацепление между альвеновскими и медленными магнитозвуковыми колебаниями [Мазур и др., 2014] приводит к появлению двух ветвей МГД колебаний: квази-альвеновских с периодом T порядка альвеновского периода T_A , смешанной поляризацией $B_z \sim B_{\perp}$, и медленной моды с большими периодами $T \gg T_A$, но большой компрессионной магнитной компонентой $B_z \gg B_{\perp}$. Спутниковые наблюдения поляризации Pi3 колебаний показывают, что они могут соответствовать медленной моде. Pi3 пульсации можно связать с магнитозвуковыми колебаниями полости в ночной магнитосфере, образованной понижением альвеновской скорости V_A [Leonovich and Mazur, 2005]. Также суббуревые Pi3 пульсации могут быть вызваны собственными колебаниями хвоста магнитосферы. Собственные периоды таких колебаний составляют первые десятки минут [Ерикович, 1969; Нусинов, 1971]. На спутниках THEMIS, находившихся в хвосте магнитосферы, Pi3 колебания были достаточно хорошо выражены. Таким образом, предложено несколько моделей, описывающих картину возбуждения Pi3 колебаний, так или иначе согласующихся с наземными и спутниковыми наблюдениями.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4210.2015.5 (БВ), Программы Президиума РАН № 9 и гранта РФФИ 15-45-05108 (ПВ, СС). Выражаем благодарность за предоставленные данные проектов NORSTAR, CARISMA, спутника GOES, THEMIS сотрудникам соответствующих центров.

Литература

- Ершкович А.И. О собственных колебаниях магнитного хвоста Земли // *Космические исследования*. 7. С. 944. 1969.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Продольная структура баллонных МГД возмущений в модельной магнитосфере // *Космические исследования*. 52. С. 187-196. 2014.
- Нусинов А.А. Влияние плазменного слоя на собственные колебания хвоста магнитосферы // *Космические исследования*. 9. С. 615-617. 1971.
- Cheng C-C., Mann I., Baumjohann W. Association of consecutive Pi2-Ps6 band pulsations with earthward fast flows in the plasma sheet in response to IMF variations // *J. Geophys. Res.* 119. P. 3617-3640. 2014.
- Guido T., B. Tulegenov, A.V. Streltsov, Large-amplitude ULF waves at high latitudes // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 119. P. 102-109. 2014.
- Leonovich A.S., V.A. Mazur, Why do ultra-low-frequency MHD oscillations with a discrete spectrum exist in the magnetosphere? // *Annales Geophysicae*. 23. P. 1075-1079. 2005.
- Pilipenko V., N. Mazur, E. Fedorov, T. Uozumi, K. Yumoto, Excitation of Alfvén impulse by the anomalous resistance onset on the auroral field lines // *Annales Geophysicae*. 23. P. 1455-1465. 2005.
- Rae I.J., K.R. Murphy, C.E.J. Watt, et al., Field line resonances as a trigger and a tracer for substorm onset // *J. Geophys. Res.* 119. P. 5343-5363. 2014.