

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИСКРЕТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pi2

Н.Р. Зелинский¹, Н.Г. Клейменова¹, А.Л. Котиков^{2,3}

¹Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, E-mail: kleimen@ifz.ru

²Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), г. Санкт-Петербург

Аннотация. Впервые выполнены исследования пространственной структуры всплесков геомагнитных пульсаций типа Pi2 (8–20 мГц) от полярных до экваториальных широт во время типичных событий двух суббурь (дрейфующей к полюсу и полярной) на основе применения нового подхода к анализу геофизических данных, разработанного в ГЦ РАН под руководством академика А.Д. Гвишиани, а именно методов так называемого Дискретного Математического Анализа (ДМА). Разработан новый выпрямляющий функционал "обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации", несущий характеристику амплитудных и поляризационных свойств отдельных волновых пакетов. При анализе использовались цифровые данные наблюдений скандинавского профиля магнитометров IMAGE с 10-ти секундной дискретизацией и данные наблюдений проекта INTERMAGNET на экваториальных, среднеширотных и субавроральных широтах с 1-секундной дискретизацией. Показано, что всплески Pi2 пульсаций появляются одновременно в глобальном масштабе (от полярных до экваториальных широт) с максимальными амплитудами на широтах максимальной интенсивности авроральной токовой струи. Установлено изменение с широтой направления вращения вектора поляризации волн. Показано, что амплитуда Pi2 пульсаций на экваторе максимальна в ночном секторе, т.е. отсутствует типичное для экваториальных широт дневное усиление колебаний.

Введение

Геомагнитные пульсации Pi2 широко исследуются уже более полувека, им посвящено несколько сотен работ, а также ряд монографий и обзорных работ [например, Троицкая и Гульельми, 1969; Пудовкин и др., 1976; Saito, 1976; Baumjohann and Glassmeier, 1984; Yumoto, 1986; Olson, 1999; Клейменова, 2007; Keiling and Takahashi, 2011; Ream et al., 2013 и др.].

Одним из важнейших свойств Pi2 пульсаций является их четкая связь с началом взрывной фазы (брейкапом) магнитосферной суббури [Saito et al., 1976, Pashin et al., 1982]. Максимум амплитуды колебаний наблюдается в локальной области широт и долгот и приурочен к области наиболее яркой вспышки полярных сияний [Murphy et al., 2009]. Традиционно при изучении Pi2 пульсаций их характеристики часто рассматриваются раздельно на высоких ($L > 5$), средних ($2 < L < 5$) и низких ($L < 2$) широтах. В высоких широтах генерацию Pi2 пульсаций обычно связывают с развитием суббури и появлением в хвосте магнитосферы быстрых потоков электронов (Bursty Bulk Flow - BBF) [например, Kepko and Kivelson, 2001; Ream et al., 2013], в средних и низких широтах – с возбуждением плазмосферных резонансов (cavity mode resonance) [например, Yeoman and Orr, 1989; Sutcliffe and Yumoto, 1991; Kwon et al., 2012]. В последние годы были разработаны новые возможные механизмы генерации Pi2 как во внутренней, так и во внешней магнитосфере, семь из которых подробно обсуждены в обзоре [Keiling and Takahashi, 2011], такие, как, например, баллонная неустойчивость, или пульсирующие процессы разрыва тока в области диполизации вблизи внутреннего края плазменного слоя хвоста магнитосферы. Однако эти модели требуют дальнейшего теоретического и экспериментального исследования.

Не установлены и механизмы распространения Pi2 пульсаций в магнитосфере от области генерации до земной поверхности на разных широтах. Следовательно, анализ пространственно-временных особенностей Pi2 остается важной задачей для изучения физического механизма генерации этого типа пульсаций и локализации их источника.

Целью данной работы является исследование широтного распределения всплесков Pi2 пульсаций на профиле наземных станций, расположенных от полярных до экваториальных широт.

Наблюдения

При анализе использовались данные наблюдений на скандинавском профиле IMAGE с 10-ти секундным разрешением (NAL, HOR, BJN, KEV, IVA, HAN) и некоторые среднеширотные (PAF, CLF и CZT) и экваториальные обсерватории (PPT, MBO, AAE) проекта INTERMAGNET с 1-секундным разрешением. Для

детального анализа были выбраны два события: полярная суббуря (04 декабря 2010 г.) и дрейфующая, т.е. распространяющаяся к полюсу, суббуря (13 апреля 2010 г.), магнитограммы которых приведены на рис. 1, а на рис. 2 показана кеограмма широтной динамики ионосферных токов, рассчитанных по методике, изложенной в работах [Kotikov et al., 1993; Котиков и Шишкина, 1997].

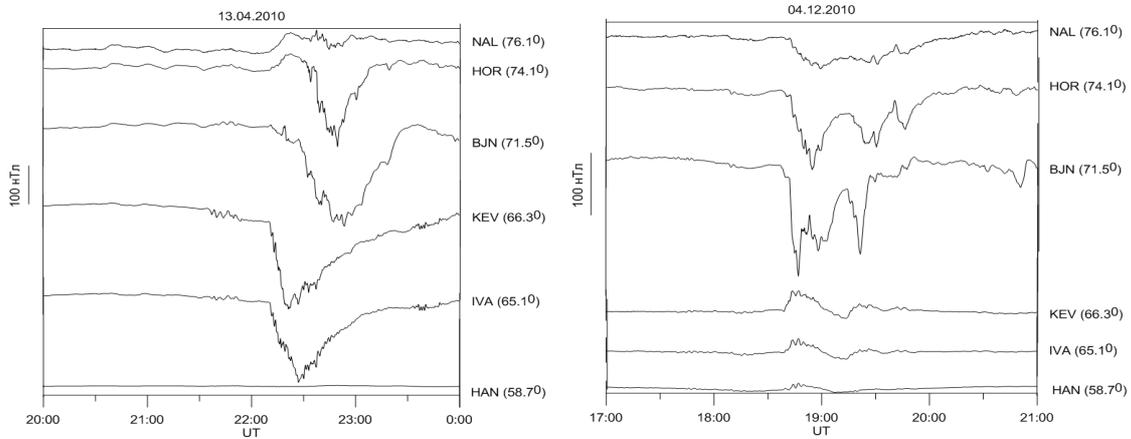


Рисунок 1. Магнитограммы суббурь 13.04.2010 и 04.12.2010 на профиле IMAGE. В скобках приведена геомагнитная широта станций.

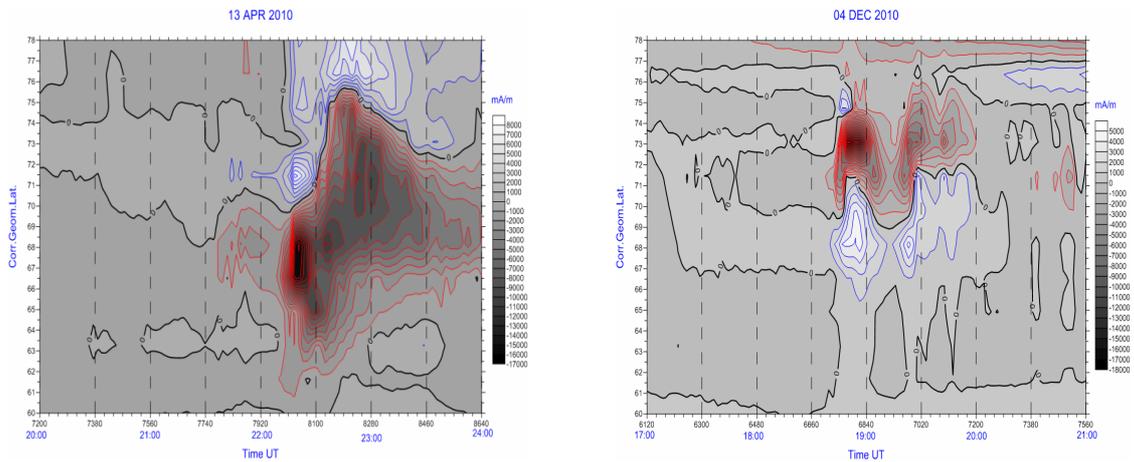


Рисунок 2. Карты распределения электрических токов в ионосфере (красный цвет – западный ток).

Первым шагом в проведении анализа P12 пульсаций была фильтрация исходных данных наблюдений в полосе частот 8-20 МГц с использованием фильтра Баттерворта 6-го порядка. На рис. 3 приведены отфильтрованные данные на профиле IMAGE (слева) и экваториальных обсерваторий (справа).

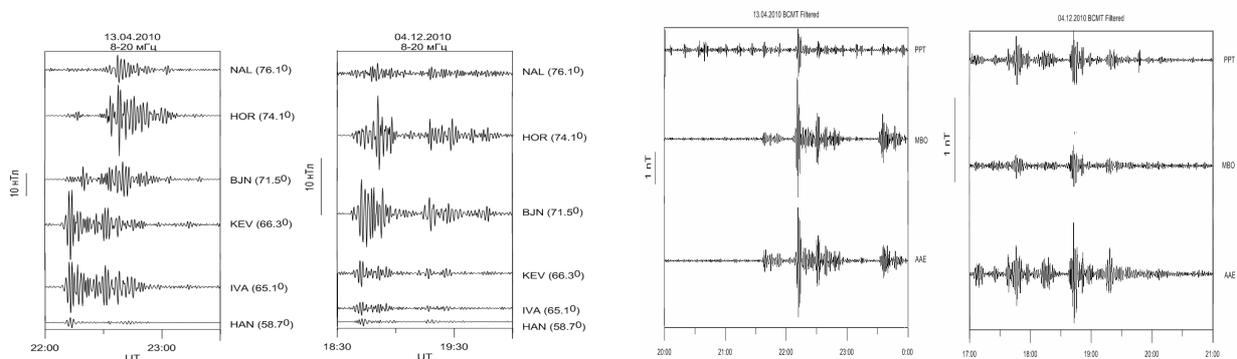


Рисунок 3. Отфильтрованные в полосе частот 8 - 20 МГц магнитограммы

Затем вычислялась матрица ковариации [Means, 1972] горизонтальных компонент поля пульсаций в выбранном временном окне. В рамках концепции дискретного математического анализа (ДМА) для дальнейших исследований был выбран “выпрямляющий” функционал [Гвишиани и др., 2008], позволивший построить амплитудную характеристику колебаний, учитывающую две компоненты поля и связанную с

поляризационными характеристиками сигнала. В качестве такого функционала была предложена и программно разработана «обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации» σ порядка p . В данной работе $p = 2$, так как выражает степень вариации собственных значений λ_1, λ_2 матрицы ковариации для каждого временного отсчета магнитограммы:

$$\sigma_p(t_i) = \left(\frac{|\lambda_1 - \bar{\lambda}|^p + |\lambda_2 - \bar{\lambda}|^p}{2} \right)^{1/p}, \bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$$

Результаты анализа геомагнитных пульсаций Pi2 на скандинавском меридиане (от полярных до экваториальных широт) показаны на рис. 4.

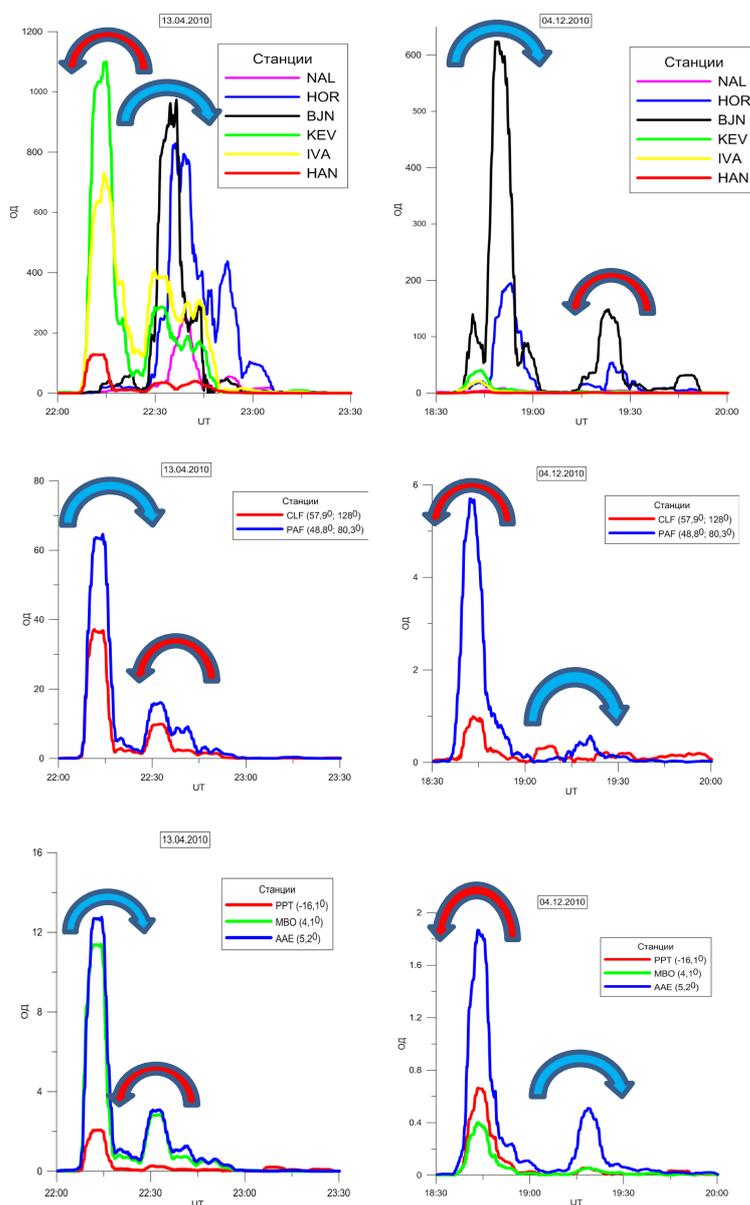


Рисунок 4. Графики обобщенной дисперсии Pi2 пульсаций в высоких, средних и экваториальных широтах, стрелкой показано направление вращения вектора поляризации (красный цвет – левое, синий – правое).

Результаты

Анализ данных наблюдений методом обобщенной дисперсии (рис. 4) показал:

-Всплески пульсаций Pi2 во время суббури были глобальными по широте и регистрировались синхронно от полярных до экваториальных широт.

-Вблизи плазмопаузы наблюдалась смена направления вращения вектора поляризации.

-На экваторе отсутствовало типичное для пульсаций околополуденное усиление волн, и в ночном секторе экваториальных широт (ААЕ) интенсивность Pi2 пульсаций была в 3-5 раз выше, чем в дневном секторе (РРТ).

-В случае дрейфующей суббури (13.04.2010) в авроральных широтах всплеск Pi2 пульсаций (~22.15 UT) был левополяризованным. Перемещение суббури в полярные широты сопровождалось новым всплеском Pi2 (~22.40 UT) с изменением поляризации на правую.

-В случае полярной суббури (04.12.2010) первый всплеск Pi2 пульсаций был правополяризованным. В последующих всплесках Pi2 поляризация изменилась на левую.

-Пространственная динамика положения максимальной амплитуды Pi2 пульсаций соответствовала пространственной динамике положения авроральной электроструи.

Выводы

Применение методов дискретного математического анализа (ДМА), в частности, функционала «обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации» для анализа геомагнитных пульсаций Pi2 на сети наземных станций, расположенных вдоль скандинавского магнитного меридиана от полярных до экваториальных широт, позволило выявить новые, не известные ранее особенности широтной структуры геомагнитных пульсаций Pi2, сопровождающих развитие как полярной, так и дрейфующей к полюсу магнитосферных суббурь. Выявленные экспериментальные факты имеют важное значение для дальнейших теоретических исследований генерации и распространения пульсаций. Полученные результаты позволяют предположить разные механизмы возбуждения Pi2 пульсаций на разных широтах.

Данная работа выполнена при поддержке Программы ОНЗ РАН №7 и частично гранта РФФИ 13-05-00233.

Список литературы

- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // ДАН. Т. 421. No 1. С. 101-105. 2008.
- Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модели космоса. М.:МГУ. ред. Панасюк М.И. Т.1. С.511-627. 2007.
- Котиков А.Л., Шишкина Е.М. Расчет пространственного распределения продольных токов в полуденном секторе авроральной зоны во время суббури // Геомагнетизм и аэронавигация, т.37. N1. С. 57 -65. 1997.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.:ЛГУ, 1976. 271 с.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физич. Наук. Т. 97. С. 453-494. 1969.
- Baumjohann W., Glassmeier K.-H. The transient response mechanism and Pi2 pulsations at substorm onset: Review and outlook // Planet. Space Sci. V. 32. P. 1361-1370. 1984.
- Keiling A., Takahashi K. Review of Pi2 models // Space Sci Rev. V. 161. P. 63-148. 2011.
- Керко Л., Kivelson M.G. Generation of Pi2 pulsations by bursty bulk flows // J. Geophys. Res. V. 106 (A02). P. 1903-1915. 2001
- Kotikov A.L., Frank-Kamenetsky A.V., Latov Yu.O., Troshichev O.A., Shishkina E.M., Murphree J.S., Elphinstone R.D. Filamentary structure of the westward electrojet in the midnight sector auroral distribution during substorms: comparison with Viking auroral observations // J. Atm. Terr. Phys. V.55. N14. P. 1763-1774. 1993.
- Kwon H.-J., Kim K.-H., Lee D.-H., Takahashi K., Angelopoulos V., Lee E., Jin H., Park Y.-D., Lee J., Sutcliffe P. R., Auster H.U. Local time-dependent Pi2 frequencies confirmed by simultaneous observations from THEMIS probes in the inner magnetosphere and at low-latitude ground stations // J. Geophys. Res. V. 117. A01206, doi:10.1029/2011JA016815. 2012.
- Means J. D. Use of the three-dimension covariance matrix in analyzing the polarization properties of plane waves // J. Geophys. Res. V. 77. N 28. P. 5551-5559. 1972.
- Murphy K R., Rae I.J., Mann I.R., Milling D. K., Watt C.E.J., Ozeke L., Frey H.U., Angelopoulos V., Russell C.T. Wavelet-based ULF wave diagnosis of substorm expansion phase onset // J. Geophys. Res. V. 114. A00C16. doi:10.1029/2008JA013548. 2009.
- Olson J.V. Pi2 pulsations and substorm onsets: A review // J. Geophys. Res., V.104. P. 17499-17520. 1999.
- Pashin A. B., Glassmeier K.H., Baumjohann W., Raspopov O.M., Yahnin A.G., Opgenoorth H.J., Pellinen R.J. Pi 2 magnetic pulsations, auroral breakups, and the substorm current wedge: A case study // J. Geophys. V. 51. P. 223-233. 1982.
- Ream J. B., Walker R. J., Ashour-Abdalla M., El-Alaoui M., Kivelson M. G., Goldstein M. L. Generation of Pi2 pulsations by intermittent earthward propagating dipolarization fronts: An MHD case study // J. Geophys. Res. Space Physics, V. 118, P. 6364-6377, doi:10.1002/2013JA018734. 2013.
- Saito T., Yumoto K., Koyama Y. Magnetic pulsation Pi2 as a sensitive indicator of magnetospheric substorm // Planet. Space Sci. V. 24. P. 1025-1029. 1976.
- Sutcliffe P. R., Yumoto K. On the cavity mode nature of low latitude Pi2 pulsations // J. Geophys. Res. V. 96. P. 1543- 1551. 1991
- Yeoman T. K., Orr D. Phase and spectral power of mid-latitude Pi2 pulsations: Evidence for a plasmaspheric cavity resonance // Planet. Space Sci. V. 37. P. 1367-1383. 1989.
- Yumoto K. Generation and propagation mechanisms of low-latitude magnetic pulsation – A review // J. Geophys. V. 60. P. 79-105. 1986