

LATITUDE BEHAVIOR OF Pc1 GEOMAGNETIC PULSATIONS IN THE DECLINING AND MINIMUM OF THE 24-th SOLAR ACTIVITY CYCLE

F.Z. Feygin, N.G. Kleimenova, Yu.G. Khabazin, L.M. Malysheva

Schmidt Institute of the Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia
e-mail: feygin@ifz.ru, kleimen@ifz.ru

Abstract. The Pc1 geomagnetic pulsations known as "pearls" have been the subject of intensive study since many years ago. It is well established that the Pc1 waves are generated via the cyclotron instability of radiation belt protons and propagate toward the Earth surface along the magnetic field lines. The plasmopause region could be the plausible area of Pc1 Alfvén wave generation. These oscillations are left-hand polarized waves. So, the ground stations, located in vicinity of the footprint of the plasmopause, should record mostly the left-handed polarized Pc1 waves. The Pc1 pulsations, long travelling in the ionospheric waveguide, change the sign of polarization and become right-hand polarized ones. Thus, the analysis of Pc1 polarization, obtained from multi-station observations, can provide some experimental information for a Pc1 source location.

The latitude features of structured Pc1 geomagnetic pulsations have been studied on the base of the Scandinavian induction magnetometer chain data in 2003 and 2008-2009. These intervals correspond to the declining ($W_p \sim 70$) and minimum ($W_p \sim 3$) phases the 24-th solar activity cycle. We compared the total, right-handed and left-handed polarized Pc1 intensity obtained first at all from two latitude considered spaced stations: Sodankylä (SOD, $\Phi=63.8^\circ$, $L \sim 5.3$) and Nurmijärvi (NUR, $\Phi=56.6^\circ$, $L \sim 3.5$). We found that in 2003, the great number of the Pc1 pulsations was stronger at NUR and showed there generally left-hand polarization. However, in 2008-2009, the strong Pc1 events were more often recorded at SOD with left-hand polarization as well. There were a lot of magnetic disturbances in 2003, and the Pc1 events were observed mostly at the end of magnetic disturbances and the previous K_p value was $\sim 3-4$. In 2008-2009, the Pc1 pulsations were observed usually after long lasting magnetically quiet time intervals with $K_p \sim 0-1$, beyond slight increasing magnetic activity. The roughly estimated plasmopause location ($L_{pp}=5.5-4.6K_p \text{ max}$) showed that in the first situation, the plasmopause was located closer to NUR, and during the second one it was located closer to SOD. That supports the idea that the area of Pc1 wave generation could be related to the vicinity of the plasmopause.

Введение

Геомагнитные пульсации Pc1 представляют собой наиболее яркий тип электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в полосе частот 0.5-2.0 Гц. Экспериментальные исследования показали, что пульсации Pc1 ("жемчужины") наблюдаются на Земле в виде периодически следующих друг за другом пакетов альвеновских волн с преимущественно левой поляризацией. Эти колебания были предметом интенсивных исследований в течение многих лет [например, Матвеева и Троицкая, 1965; Троицкая и Гульельми, 1969; Фейгин и Якименко, 1969; Gendrin *et al.*, 1971; Троицкая и др., 1975; Фейгин и др., 2003; Kangas *et al.*, 1998; Mursula, 2007; Demekhov, 2007]. Длительность серий Pc1 составляет от получаса до нескольких часов. Наиболее часто Pc1 пульсации наблюдаются на спаде и в минимуме солнечной активности [например, Матвеева и Троицкая, 1965; Mursula, 2007]. Возбуждение геомагнитных пульсаций типа Pc1 связано с резонансным циклотронным взаимодействием волн и частиц в магнитосфере Земли [см., обзоры Троицкая и Гульельми, 1969, Kangas *et al.*, 1998; Demekhov, 2007].

Генерация Pc1 пульсаций характерна для восстановительной фазы магнитной бури, когда происходит распад кольцевого тока и заполнение плазмосферы холодной плазмой, что улучшает условия для развития циклотронного резонанса, приводящего к возбуждению Pc1 пульсаций.

Целью данной работы является анализ широтного пространственного распределения геомагнитных пульсаций Pc1 по данным наземных наблюдений на скандинавском профиле из 5 индукционных магнитометров (<http://sgo.fi/Data/Pulsation/pulArchive.php>). Поскольку известно, что Pc1 пульсации на земной поверхности чаще наблюдаются на спаде и в минимуме солнечной активности, для анализа были выбраны 2 интервала: 2003 год (спад солнечной активности) и 2008-2009 годы (минимум 24 цикла солнечной активности). Наиболее подробно анализировались данные, в обсерваториях SOD ($\Phi=63.8^\circ$, $L \sim 5.3$) and NUR ($\Phi=56.6^\circ$, $L \sim 3.6$), представленные на сайте в виде спектрограмм общей интенсивности сигналов и лево- и право-поляризованных волн.

Результаты анализа

Анализ данных наблюдений в годы минимума солнечной активности (2008, 2009) показал, что Pc1 пульсации, в основном, наблюдались в начале роста магнитной активности, после магнитоспокойных интервалов с $Kp \sim 0-1$. В этих условиях, как правило, пульсации были сильнее в SOD ($L \sim 5.3$), чем в NUR ($L \sim 3.6$). В SOD волны были преимущественно лево-поляризованными (L), а в NUR – право-поляризованными (R). На рис. 1 показан пример такого события.

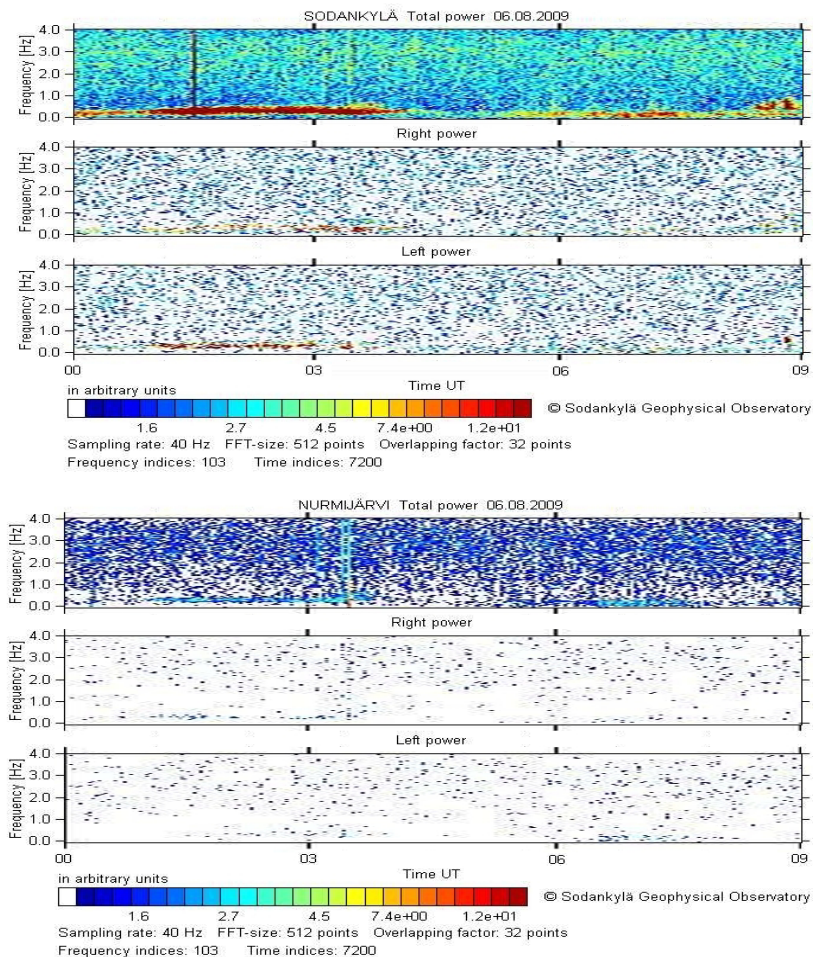


Рисунок 1. Магнитограммы обс. SOD и NUR в минимуме солнечной активности, сверху вниз: общая интенсивность сигналов и интенсивность лево- и право-поляризованных волн

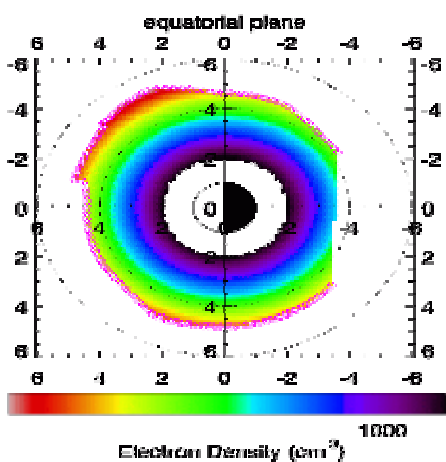


Рисунок 2. Положение плазмопаузы для случая, показанного на рис. 1

Как показали оценки положения плазмопаузы по формуле ($L_{pp}=5.5-0.46 Kp_{max}$), где Kp_{max} - максимальное значение Kp за предшествующие 24 часа, в этих условиях плазмопауза располагалась на $L\sim 5.0-5.5$. Такой же результат получается (рис. 2) при использовании модели www.spaceweather.eu.

На спаде солнечной активности (2003 г.) геомагнитные пульсации $Pc1$, в основном, наблюдались на восстановительной фазе магнитной бури, после магнитных возмущений. В этих условиях, как правило, пульсации были сильнее в NUR ($L\sim 3.6$), чем в SOD ($L\sim 5.3$). В NUR волны были преимущественно лево-поляризованными (L), а в SOD – право-поляризованными (R). Пример такого события показан на рис.3. Как показали оценки положения плазмопаузы, в этих условиях плазмопауза располагалась на $L\sim 3.5-4.0$. Такой же результат получается (рис.6) при использовании модели www.spaceweather.eu.

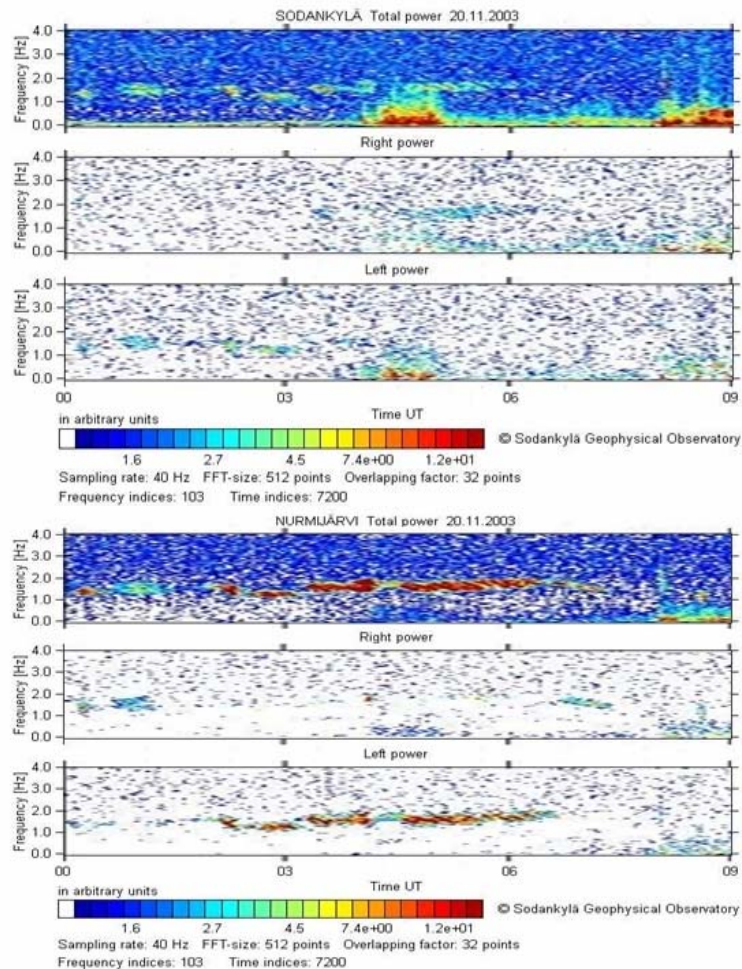


Рисунок 3. Магнитограммы obs. SOD и NUR на спаде солнечной активности, сверху вниз: общая интенсивность сигналов и интенсивность лево- и право-поляризованных волн.

Обсуждение

Геомагнитные пульсации $Pc1$ представляют собой лево-поляризованные (альвеновские) волны, следовательно, волны с левой поляризацией должны регистрироваться вблизи проекции их источника. В этой же области интенсивность геомагнитных пульсаций будет наибольшей.

Появление право-поляризованных волн может быть связано с захватом альвеновских волн в ионосферный волновод [см, например, *Greifinger and Greifinger, 1968*], в котором минимальное значение альвеновской скорости приходится на максимум слоя F2. При этом левая поляризация волн (альвеновские) меняется на правую (быстрая магнитозвуковая волна). Эти волны переносят энергию поперек силовых линий геомагнитного поля, т.е. вдоль ионосферного волновода. Волноводное затухание $Pc1$ увеличивается с уменьшением частоты, и на частотах ниже ~ 0.5 Гц (частота отсечения) по ионосферному волноводу волны не могут распространяться. Экспериментально это было установлено еще в ранних работах, например, [*Троицкая и др., 1975*].

Другой причиной прихода в точку наблюдения волн с правой поляризацией может быть наличие в магнитосферной плазме ионов He^+ . Генерация $Pc1$ происходит в экваториальной плоскости магнитосферы с

левой поляризацией. Однако при наличии определенного количества ионов гелия на участке силовой линии в области широт $\sim 10\text{--}30^\circ$ может происходить реверс поляризации за счет возникновения «туннельного эффекта» [Perraut *et al.*, 1984], т.е. канализации Pc1 вдоль силовой линии в виде магнитозвуковых волн с правой поляризацией. Математическое подтверждение эффекта туннелирования волн через область непрозрачности и проникновения волн в приионосферные области проводимости рассмотрено в работе Михайловой [2011].

Представленный анализ данных в SOD и NUR показывает довольно четкую связь источника генерации Pc1 пульсаций с положением плазмопаузы. Эта область магнитосферы важна для продольного (вдоль силовой линии) распространения волн. Условие продольного распространения сохраняется на всей траектории сигнала в том случае, когда эффекты кривизны силовых линий и неоднородности фоновой плазмы поперек магнитных оболочек компенсируют друг друга [Гульельми, 1979]. Плазмопауза является наиболее благоприятной областью для выполнения этого условия. Кроме того, наличие плазмопаузы важно не только для продольного распространения альвеновских волн, но и для их генерации. Инкремент неустойчивости альвеновских волн существенно зависит как от концентрации горячих анизотропных протонов, так и от плотности фоновой плазмы. Именно на плазмопаузе в области радиационного пояса Земли (РПЗ) возможен переход РПЗ в неустойчивое состояние и генерация Pc1 пульсаций [Тверской, 1968]. Не исключено, однако, что спорадически в магнитосфере возникают условия для продольного распространения и генерации Pc1 и в других областях магнитосферы.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать заключение, что генерация геомагнитных пульсаций Pc1 происходит преимущественно в районе плазмопаузы. В работе подчеркнута важная роль плазмопаузы как для продольного распространения альвеновских волн, так и для их генерации.

Acknowledgements. The paper was supported by the Program No 9 of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (RAS) and partly by the RFBR Grants № 14-05-00850, 15-05-07623 (F.F. and Yu.Kh.) and № 13-05-00233 (L.M. and N.K.)

Список литературы

- Гульельми А.В. МГД - волны в околоземной плазме. М.: Наука. 139 с. 1979.
- Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие “жемчужин” при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны// *Геомагнетизм и аэронаука*. Т. 9. С. 700–705. 1969.
- Матвеева Э.Т., Троицкая В.А. Общие закономерности колебательного режима типа «жемчужин»// *Геомагнетизм и аэронаука*. Т. 5. № 6. С. 1078-1084. 1965.
- Михайлова О.С. О возможности локализации волн Pc1 вблизи ионосферы с учетом наличия тяжелых ионов в магнитосфере Земли// *Солнечно-земная физика*. Т. 19. С. 83-87. 2011.
- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука. 223 с. 1968.
- Троицкая В.А, Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // *Успехи физ. наук*, Т. 97. С. 453-494. 1969.
- Троицкая В.А., Баранский Л.Н., Матвеева Э.Т., Фейгин Ф.З., и др. О положении источников пульсаций Pc1 в магнитосфере// *Геомагнетизм и Аэронаука*. Т. 15. P. 525-531. 1975.
- Demekhov A.G. Recent progress in understanding Pc1 pearl formation// *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. P. 1609-1622. 2007.
- Feygin F.Z, Yakimenko V.L. Appearance and development of geomagnetic Pc1 type micropulsations ("pearls") due to cyclotron instability of proton belt// *Ann. Geophys.* V. 27. P. 49–55. 1971.
- Gendrin R., Lacourly S., Roux A., Solomon J., Feygin F.Z., Gokhberg M.B., Troitskaya V.A., Yakimenko V.L. Wave packet propagation in an amplifying medium and its application to the dispersion characteristics and to the generation mechanism of Pc1 events// *Planet. Space Sci.* V. 19.P. 165-194. 1971.
- Greifinger C., Greifinger P.S. Theory of hydromagnetic propagation in the ionospheric waveguide// *J. Geophys. Res.* V. 73. P. 7473-7490. 1968.
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of shortperiod magnetic pulsations// *Space Sci. Rev.* V. 83. P. 435–512. 1998.
- Mursula K. Satellite observations of Pc1 pearl waves: The changing paradigm// *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. P. 1623–1634. 2007.
- Perraut S., Gendrin R., Roux A., de Villedary C. Ion cyclotron waves: direct comparison between ground-based measurements and observations in the source region// *J. Geophys. Res.* V. 89 (A1).P. 195-202, 1984.