

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.38-41

СЛОЖНЫЕ ЭМИССИИ Pc1 НА ПОЗДНЕЙ ФАЗЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ В СЕНТЯБРЕ 2017

Ф.З. Фейгин, Н.Г. Клейменова, Л.М. Малышева, Ю.Г. Хабазин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследуется необычный всплеск геомагнитных пульсаций Pc1 со сложным динамическим спектром, наблюдаемый в конце восстановительной фазы магнитной бури 7–8 сентября 2017 года. Данные наблюдений на цепочке индукционных магнитометров IMAGE показали, что динамический спектр этих пульсаций был аналогичным на геомагнитных широтах 57–67°. Необычный спектр Pc1 пульсаций, по-видимому, является результатом суперпозиции двух ионно-циклотронных эмиссий, генерирующихся на разных L -оболочках. Одна эмиссия связана со «старой» плазмопаузой, сформированной при спокойных геомагнитных условиях ($K_p=0$) 10 сентября, а вторая эмиссия может быть связана с резким возрастанием магнитной активности до $K_p=3$ в ночь на 11 сентября и затем постепенным уменьшением динамического давления солнечного ветра, что привело к перемещению плазмопаузы к большим L -оболочкам.

Введение

Интерес к изучению пульсаций Pc1 связан с важной ролью, которую они играют в системе солнечно-земных связей. Pc1 пульсации генерируются в результате циклотронной неустойчивости протонов радиационных поясов с анизотропным распределением скоростей [Cornwall, 1966; Kennel and Petchek, 1966; Feygin and Yakimenko, 1971, и многие другие]. Эти пульсации чувствительны к изменениям динамики и структуры магнитосферы. Целью данной работы является исследование новых необычных пульсаций и их связи с геофизическими процессами в магнитосфере и солнечном ветре.

Магнитная буря 7-8 сентября 2017 г.

На спаде 24-го цикла солнечной активности 7-8 сентября 2017 года произошла сильная магнитная буря с $Dst \sim -150$ нТл и $K_p = 8$. Перед бурей магнитная активность была повышенной ($K_p \sim 2-4$), но 9 сентября K_p -индекс упал до $K_p = 0$ (рис. 1, 2). В ходе этой бури на цепи скандинавских индукционных магнитометров было зарегистрировано только одно событие Pc1 с необычно сложным спектром (рис. 3, 4).

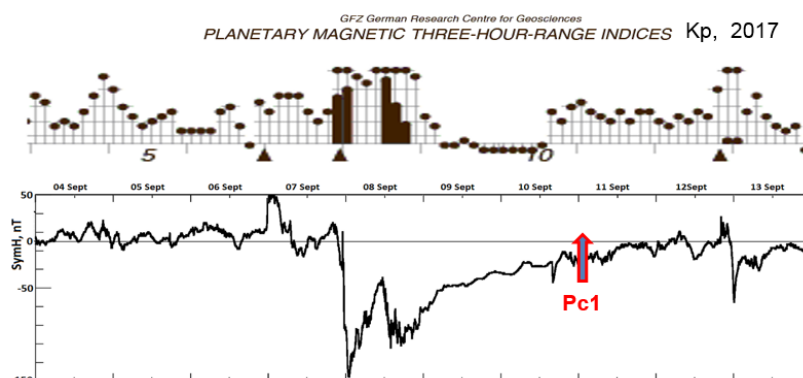


Рисунок 1. Вариации K_p и $SymH$

Необычные Pc1 пульсации

Pc1 событие 11 сентября 2017 представляло собой суперпозицию двух разных эмиссий, генерируемых одновременно в двух разных источниках.

Первая эмиссия напоминала классические пульсации Pc1 продолжительностью ~ 4 часа при несколько увеличивающейся центральной частоте (от $\sim 1,4$ до $1,7$ Гц), но с необычно широкой полосой ($\sim 0,6$ Гц). Такие Pc1 пульсации обычно генерируются вблизи плазмопаузы [Guglielmi, Kangas, 2007; Kangas et al., 1998]. Мы полагаем, что генерация этих волн связана со «старой» плазмопаузой, сформировавшейся в предшествующий спокойный период ($K_p=0$).

Вторая эмиссия Pc1 представляла собой серию всплесков (диапазон частот 2–3 Гц, $Kp=3$) с периодом повторения от 7 до 15 мин. Такие серии всплесков – редкое событие. Каждый всплеск длился около 20–25 мин, при этом центральная частота практически не изменялась, но каждый следующий всплеск начинался с более низкой частоты. Все всплески имели широкий частотный спектр $\Delta f/f_0 \sim 0.4$ по сравнению с классическими «жемчужинами» (у которых $\Delta f/f_0 \sim 0,1$). Общий тренд частоты был от 2,5 Гц до 1,5 Гц и продолжался от 01 UT до 02.30 UT.

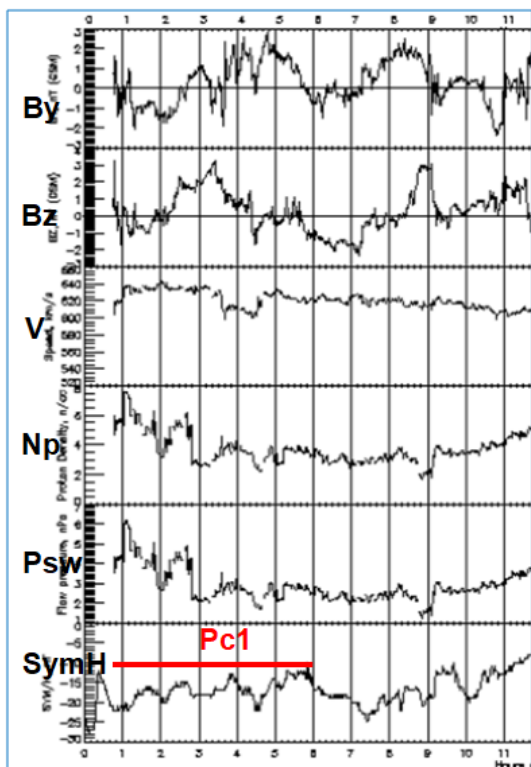


Рисунок 2. Данные по ММП и солнечному ветру 11 сентября

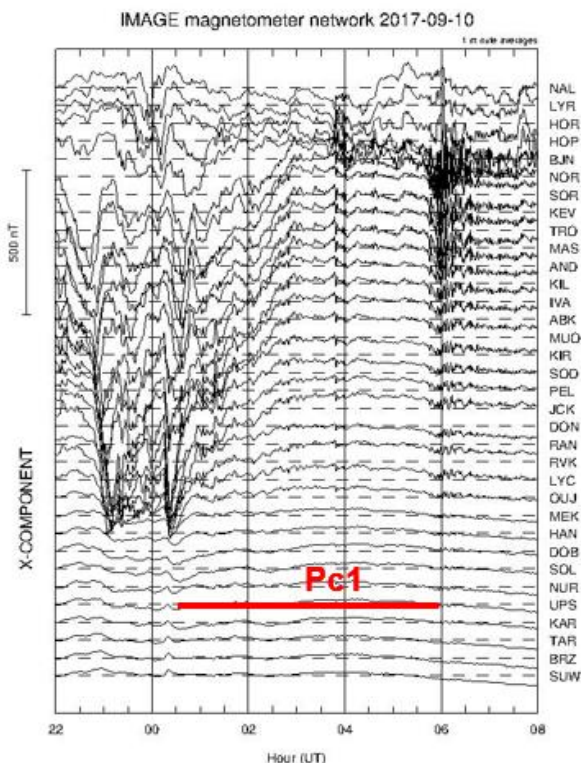


Рисунок 3. IMAGE магнитограмма 10-11 сентября

Обсуждение

Положение плазпаузы при $Kp=3$ можно оценить по формуле $L_{mp} = 6.0 - 0.6Kp$ [Binsack, 1967]. Таким образом, в начале второй эмиссии Pc1 плазпауза могла находиться на $L \sim 4.2$.

Характер второй эмиссии Pc1 можно объяснить в рамках общепринятой модели резонансного взаимодействия электромагнитных ионных циклотронных (ЭМИЦ) волн с горячими анизотропными протонами в магнитосфере Земли (см., например, Demekhov, 2007]. Максимальное усиление ЭМИЦ волн происходит на частоте [Feygin and Yakimenko, 1971; Gendrin et al., 1971]:

$$\omega_0 = \frac{e_i}{4\pi m_i c} \frac{B^2}{(4\pi m_i N_i)^{1/2} U_{||}}, \quad (1)$$

где $U_{||}$ – тепловая продольная скорость горячих протонов, B – геомагнитное поле в области генерации, а N_i – эффективная концентрация ионов.

Известно, что наиболее благоприятная область генерации Pc1 находится вблизи плазпаузы. В течение рассматриваемого временного интервала из-за значительного снижения динамического давления солнечного ветра (Psw) от 6 нПа до 2 нПа (рис. 5б) область генерации волн расширилась, а плазпауза переместилась на более высокие L -оболочки.

В соответствии с этим мы предполагаем, что источник пульсации Pc1 в фазе восстановления магнитной бури сдвинулся также на более высокие L -оболочки, т.е. в область с уменьшенным магнитным полем (входящим в уравнение (1) как B^2) и плотностью фоновой плазмы. Оба этих параметра управляют частотой Pc1 (см. уравнение (1)). Однако влияние магнитного поля более значимо, чем изменение плотности плазмы.

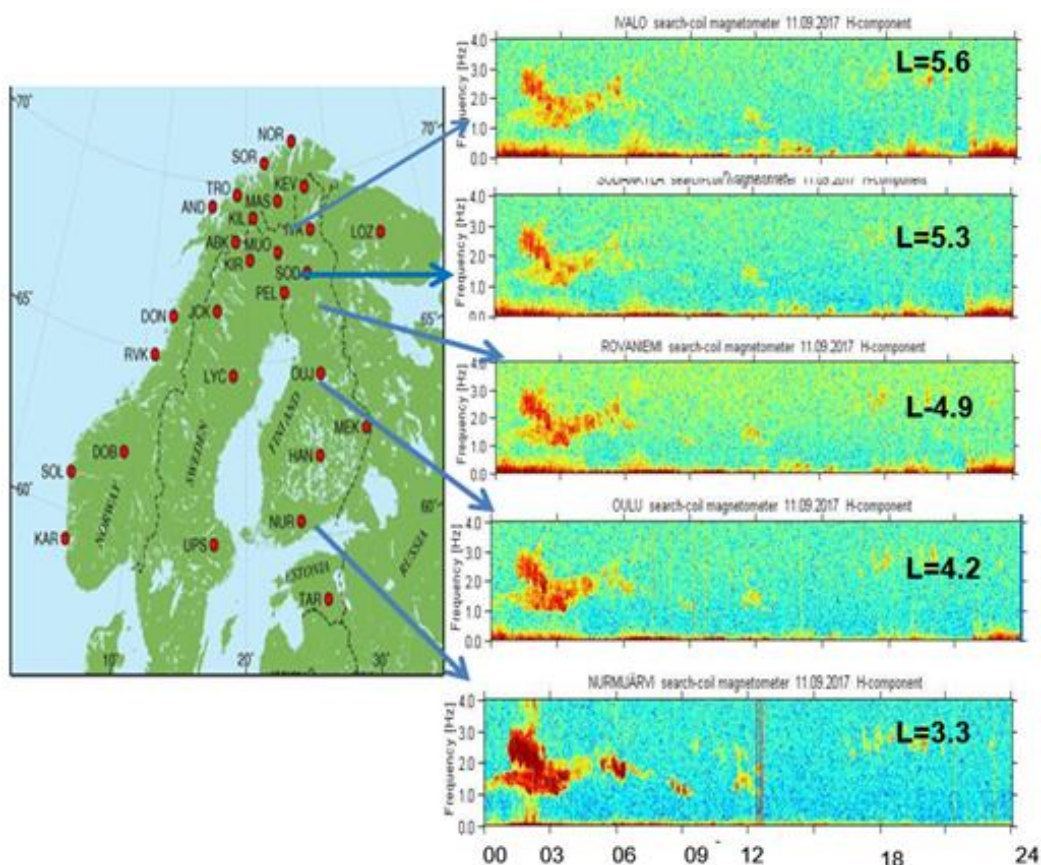


Рисунок 4. Спектрограммы Pc1 на Скандинавских станциях

Такое движение источника может привести к уменьшению частоты Pc1, как это видно на всех рассматриваемых станциях на 01–03 UT (рис. 4).

Другой особенностью рассматриваемых событий являются довольно широкие динамические спектры пульсаций (рис. 5а), что может быть результатом уширения спектра волны из-за квазилинейного взаимодействия с частицами.

Различные формы динамического спектра можно объяснить на основе одного только предположения о генерации Pc1 циклотронной неустойчивостью. Согласно результатам, полученным [Gendrin *et al.*, 1971], ширина полосы спектра Pc1 определяется магнитным полем и плотностью фоновой плазмы в верхней части силовой линии геомагнитного поля, и мы можем приблизительно оценить, это как

$$\Delta\omega \propto B^{1/2} N_i^{3/2}. \quad (2)$$

Около 01.00 UT плазмосфера была поджата, а плазмопауза находилась в области с увеличенными магнитным полем и плотностью фоновой плазмы. Как следствие, и спектральная ширина Pc1 в это время была увеличена. Позднее (в нашем случае около ~02.30 UT), когда плазмопауза сдвинулась к более высоким L , то есть в область низкого магнитного поля и более низкой плотности фоновой плазмы, ширина спектра Pc1 уменьшилась.

Отметим, что высыпание протонов в ионосферу может изменить количественные параметры ионосферы, а это, в свою очередь, может привести к изменению частоты пропускания частотного диапазона через ионосферный альвеновский резонатор [Yahnin *et al.*, 2007].

Выводы

1. Во время сильной магнитной бури 7–8 сентября 2017 года было обнаружено необычное событие Pc1 в конце поздней фазы восстановления магнитной бури.
2. Эти пульсации с похожими сложными динамическими спектрами наблюдались на всех наземных скандинавских станциях, расположенных от $L=3.3$ до $L=5.6$ с максимумом амплитуды на самой низкоширотной станции (NUR, $L=3.3$).
3. Высказано предположение, что обсуждаемое Pc1 событие является суперпозицией двух ионно-циклотронных эмиссий, возбуждающихся на разных L -оболочках. Одна эмиссия связана со «старой»

плазмопаузой, сформированной при спокойных геомагнитных условиях ($K_p=0$) 10 сентября. Вторая может быть связана с новым положением плазмопаузы, образовавшимся 11 сентября при увеличенной магнитной активности ($K_p=3$). Затем, следуя уменьшению динамического давления солнечного ветра (P_{sw}), плазмопауза постепенно перемещалась к большим L -оболочкам, то-есть в область с меньшими значениями магнитного поля и плотности плазмы, а это приводило к наблюдаемому снижению частоты и уменьшению ширины спектра.

4. Сделан вывод, что необычный динамический спектр Pc1 пульсаций 11 сентября 2017 года определялся динамическим давлением солнечного ветра, динамикой плазмопаузы и нелинейными процессами.

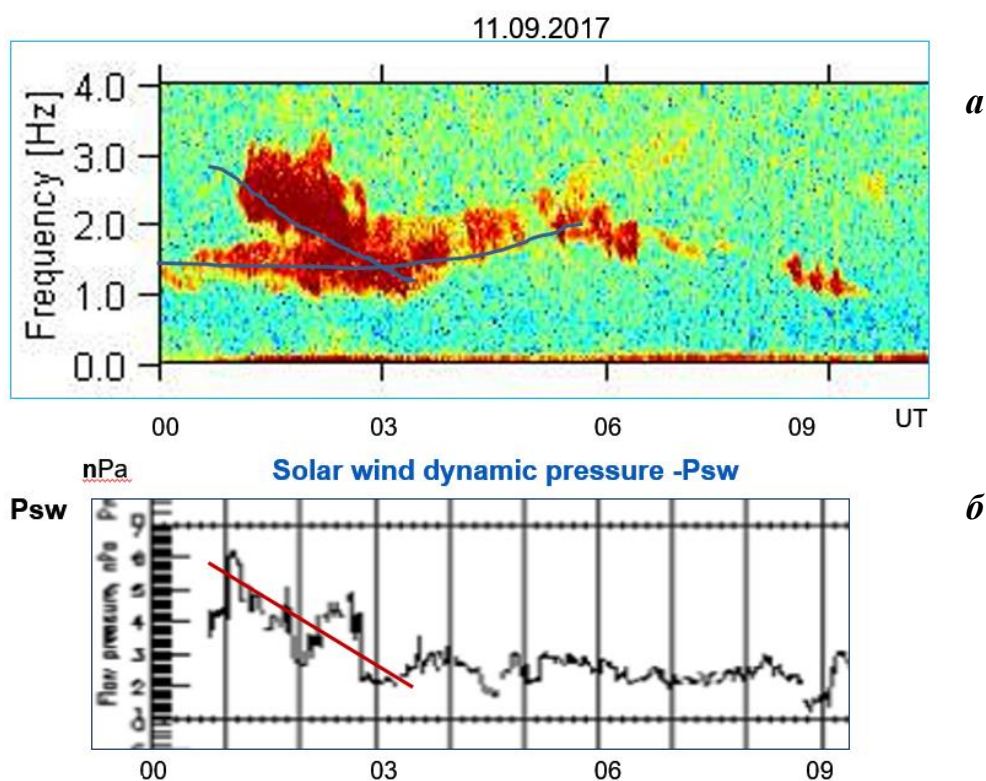


Рисунок 5. (а) – Спектрограмма Pc1 в обс. NUR ($L=3.3$), (б) – вариации Psw

Список литературы

- Binsack J.H. (1967). Plasmapause observations with the M.I.T. experiment on IMP 2, *J. Geophys. Res.*, 72, 5231–5237. DOI: 10.1029/JZ072i021p05231.
- Cornwall J.M. (1966). Micropulsations and the outer radiation zone, *J. Geophys. Res.*, 71, 2185–2199.
- Demekhov A.G. (2007). Recent progress in understanding Pc1 pearl formation, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 69, 1609–1622.
- Feygin F.Z., Yakimenko V.L. (1971). Appearance and development of geomagnetic Pc1 type micropulsations ("pearls") due to cyclotron instability of proton belt, *Ann. Geophys.*, 27, 49–55.
- Gendrin R., Lacourly S., Roux A., Solomon J., Feygin F.Z., Gokhberg M.B., Troitskaya V.A., Yakimenko V.L. (1971). 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.*, 19, 165–194.
- Guglielmi A., Kangas J. (2007). Pc1 waves in the system of solar terrestrial relations: New reflections // *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys.*, 69, 1635–1643.
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. (1998). Morphology and physics of short-period magnetic pulsations, *Space Sci. Rev.*, 83, 435–512.
- Kennel C.F., Petschek H.E. (1966). Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.* 71, 1–28.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A. (2007). Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 69, 1690–1706.
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Popova T.A., Demekhov A.G. (2017). Proton aurora to the equator from the oval as a manifestation of the ion-cyclotron instability in the Earth' magnetosphere (brief review), *Proc. 40-th Apatity Semin. Physics of Auroral Phenomena*, 40, 66–73.