

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.81-84

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДНЕВНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc4: СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВ VAN ALLEN PROBES

О.С. Михайлова, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
e-mails: o\_mikhailova@iszf.irk.ru, klimush@iszf.irk.ru, p.mager@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Проведено статистическое исследование геомагнитных пульсаций Pc4, наблюдаемых спутниками Van Allen Probes. Обнаружено более 90 событий Pc4, зарегистрированных на дневной стороне Земли. События классифицировались визуально и разделялись на категории: 1) амплитудно-модулированные колебания с полоидальной или смешанной поляризацией, 2) тороидальные колебания, 3) компрессионные волны, 4) колебания со сменой поляризации.

### Введение

Геомагнитные пульсации или ультра-низкочастотные (УНЧ) волны регулярно наблюдаются в Земной магнитосфере. УНЧ-волны эффективно взаимодействуют с высокоэнергичными заряженными частицами кольцевого тока и радиационных поясов. Длиннопериодные УНЧ диапазона Pc4 (40-150 с) чаще всего наблюдаются в виде первой и второй гармоник колебаний силовой линии. Волны диапазона Pc4 могут быть полоидальными и тороидальными. В первом случае, осцилляция силовой линии происходит в радиальном направлении, во втором – в азимутальном. Общепринято, что волны Pc4 представляют собой колебания, стоячие между сопряженными ионосферами, однако полоидальные моды Pc4 могут быть также заперты в магнитосферном резонаторе [Mager et al., 2018].

Статистические исследования волн диапазона Pc4 проводились неоднократно. В работах [Anderson et al., 1990; Takahashi and Anderson, 1992] исследовались MLT-L распределения пульсаций Pc4 с использованием данных спутников AMPTE/CC. Было обнаружено, что Pc4 наблюдаются преимущественно в дневной части магнитосферы. Используя данные миссии THEMIS, авторы работ [Angelopoulos, 2008; Liu et al., 2009] исследовали распределение волн Pc4 от L=4 до L=9. Показано, что Pc4 чаще всего наблюдаются в области плазмопаузы при L=5-6. В работе [Dai et al., 2015] авторы исследовали MLT-L распределение компрессионных и некомпрессионных волн Pc4 с использованием данных системы спутников Van Allen Probes.

В последние годы стало понятно, что Pc4 могут иметь большую продольную компоненту магнитного поля (компрессионные волны) [Chelpanov et al., 2016; Kostarev and Mager, 2017], а также может происходить смена поляризации с полоидальной на тороидальную, или наоборот [Leonovich and Klimushkin, 2015].

В данной работе предлагается новая классификация УНЧ-волн диапазона Pc4, связанная со структурой волны. События исследовались по-отдельности, после чего визуально классифицировались на четыре категории: 1) полоидальные волны или волны со смешанной поляризацией, 2) тороидально-поляризованные колебания, 3) компрессионные волны и 4) колебания со сменой поляризации.

### Данные и метод обработки

В работе были использованы данные системы из двух спутников Van Allen Probes, находящиеся в открытом доступе на сайте <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>. Рассматривались события, произошедшие на освещенной стороне магнитосферы в период с 1 ноября 2013 г по 31 марта 2014 г. Всего за период зарегистрировано более 90 событий, из них 80 были детально исследованы. Для анализа каждого события использовались данные магнитного поля с 4-секундным разрешением, полученные инструментом EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) [Kletzing et al., 2013]. Поиск осциллирующих геомагнитного поля выполнялся с помощью использования фильтра Windowed-Sinc. Данные отфильтровывались в выбранном диапазоне частот (40-150 с). После производился разворот системы координат для того, чтобы ориентировать компоненты магнитного поля по геомагнитному полю. Кроме того, производилось вейвлет-преобразование Морле для каждого события для оценки динамического спектра колебаний.

Классифицировались события визуально на основе осциллограмм компонент магнитного поля и динамического спектра. Впоследствии строились распределения появления каждого типа событий дневных событий Pc4. Статистика появления каждого типа волн Pc4 показана на рис. 1: большинство зарегистрированных волн Pc4 были полоидальными. Из рассмотренных 80 событий – 51 событие имело

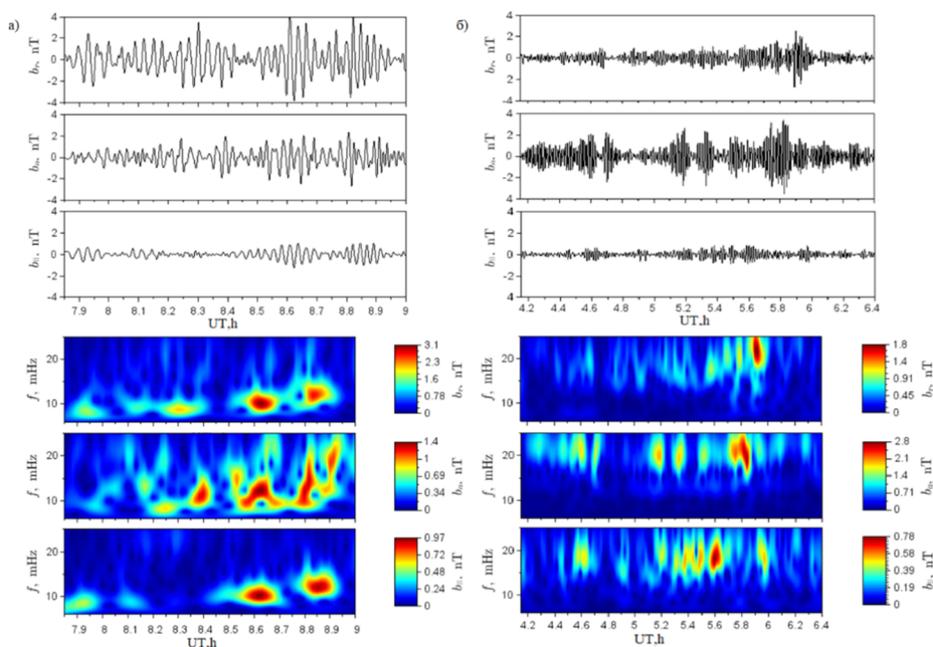
полоидальную или смешанную поляризации. Длительность всех наблюдаемых событий составила 194,5 часов, из них: 132,6 – волны со смешанной и полоидальной поляризацией, 23,3 – с тороидальной, 20,1 – компрессионные волны и 18,5 часов – волны со сменой поляризации.



**Рисунок 1.** а) Статистика появления зарегистрированных волн Pc4 с разбивкой по категориям; б) Длительность зарегистрированных событий Pc4.

### Полученные результаты

На рис. 2а представлен пример полоидальной волны с преобладанием радиальной компоненты. Эта амплитудно-модулированная волна с частотой около 12 мГц наблюдалась 1 марта 2014 г. Радиальная компонента магнитного поля превосходит азимутальную по амплитуде, а продольное магнитное поле мало. Волна классифицировалась как полоидальная, если выполнялись условия:  $|b_r|/|b_a| \geq 1$ ,  $|b_r|/|b_{||}| > 1$ , здесь  $b_r$ -радиальная компонента магнитного поля,  $b_a$ - азимутальная компонента и  $b_{||}$  - продольная. Волны со смешанной поляризацией, когда радиальная и азимутальная компоненты имели равную амплитуду, также были отнесены к этой категории.

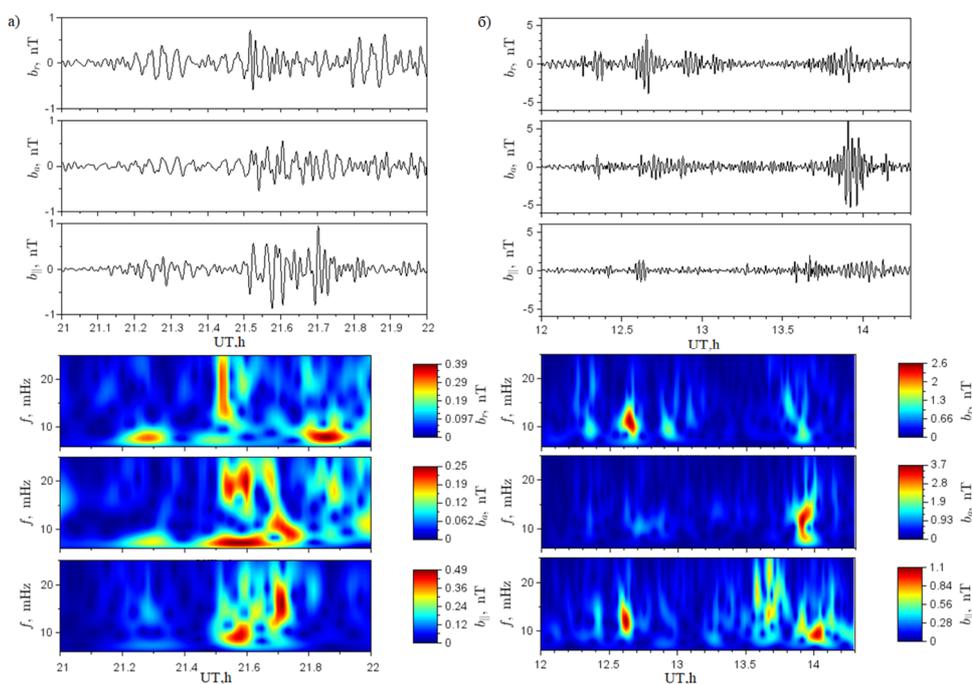


**Рисунок 2.** а) Пример полоидальной волны Pc4, зарегистрированной 1.03.2014 г. *Верхний блок:* компоненты магнитного поля ( $b_r$ -радиальная,  $b_a$ - азимутальная и  $b_{||}$  - продольная). *Нижний блок:* динамический спектр. б) Пример тороидальной волны Pc4 от 30.03.2014 г.

На рис. 2б можно увидеть пример тороидально-поляризованной волны. В этом случае величина азимутальной компоненты магнитного поля преобладает:  $|b_a|/|b_r| > 1$ ,  $|b_a|/|b_{||}| > 1$ . Большинство наблюдаемых событий, классифицированных как тороидальные, имели радиальную компоненту, однако амплитуда радиальной компоненты была существенно ниже амплитуды азимутальной компоненты. В отличие от полоидальных волн, тороидальные наблюдались значительно реже – всего 12 из 80 рассмотренных случаев.

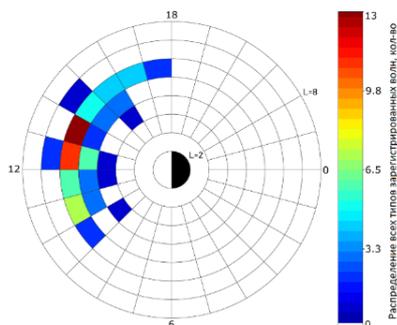
Компрессионные волны Pc4 с большим продольным магнитным полем в дневной магнитосфере также наблюдаются. Еще 12 из 80 рассматриваемых нами событий пришлось на их число. Волны

классифицировались как компрессионные, если продольная компонента магнитного поля была равна или превышала оставшиеся две компоненты поля:  $|b_{\parallel}|/|b_r| \geq 1$  и  $|b_{\parallel}|/|b_a| \geq 1$ . Примером компрессионной волны может являться событие 7 февраля 2014 г. Компрессионная (продольная) компонента магнитного поля этой волны превышала радиальную и азимутальную компоненты (рис. 3а).



**Рисунок 3.** а) Пример компрессионной волны Pc4 и ее динамический спектр; б) Пример смены поляризации волны Pc4 с полоидальной на тороидальную.

Наиболее редкими представителями Pc4 являются волны со сменой поляризации. Среди рассмотренных событий лишь 5 были отнесены к данной категории. Событие, выбранное для примера и представленное на рис. 3б, произошло 1 января 2014 г. С 12.2 UT до 13.3 UT волна имела четко выраженную полоидальную структуру, однако в 13.6 UT поляризация изменилась на тороидальную и оставалась такой до 14.2 UT. Это означает, что с 12.2 UT до 13.3 UT волна находилась на полоидальной поверхности, имела полоидальную поляризацию, затем в процессе распространения внутри магнитосферы оказалась на тороидальной поверхности, и стала тороидальной. Частота волны не претерпела существенного изменения, осталась около 11 мГц, значит, мы наблюдали одну и ту же волну.

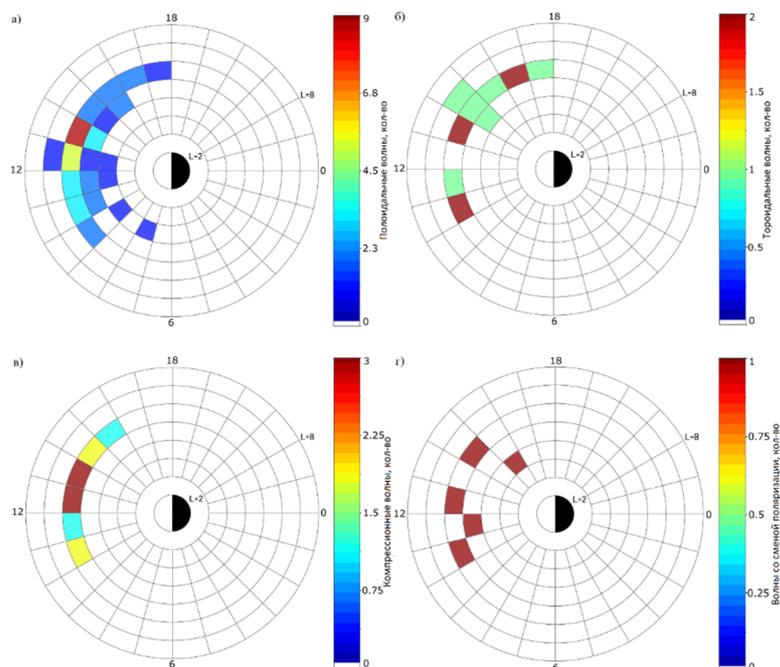


**Рисунок 4.** MLT-L диаграмма распределения возникновения дневных пульсаций Pc4 в период с 1.11.2013г. по 31.03.2014г. Разрешение: 1 ч по MLT и 1R<sub>E</sub> по L.

Известно, что волны Pc4 активно наблюдаются в дневной магнитосфере [Anderson *et al.*, 1990]. Данное же исследование показало, что максимальная вероятность появления пульсаций Pc4 приходится на полуденную зону магнитосферы и смещена к вечерней части. На рис. 4 показана MLT-L диаграмма распределения появлений всех зарегистрированных волн диапазона Pc4 на магнитных оболочках L=2-8. Видно, что максимальное количество событий зарегистрировано в полуденном и послеполуденном секторе. Чаще всего колебания наблюдались на магнитных оболочках L=5-6, что соответствует расположению плазмосферы. Наиболее часто возникали колебания с полоидальной поляризацией, их распределение показано на рис. 5а, наибольшее количество таких событий зарегистрировано в полуденной области. Наблюдались полоидальные волны на расстоянии от 3 до 7 R<sub>E</sub>. Тороидальные колебания также сосредоточены в полуденном и послеполуденном секторах магнитосферы (рис. 5б). Тороидальные волны появлялись на магнитных оболочках L=4-7. Меньшую протяженность по радиусу показали компрессионные Pc4. На рисунке 5в видно, что все зарегистрированные дневные компрессионные Pc4 волны были сосредоточены на оболочках L=5-6. Компрессионные Pc4 также показали максимум появлений в полуденной меридиональной

оболочках L=5-6. Компрессионные Pc4 также показали максимум появлений в полуденной меридиональной

области. Волны со сменой поляризации наблюдались на L=3-6, и в околополуденной области с небольшим смещением в сторону вечера.



**Рисунок 5.** а) MLT-L диаграмма распределения появления полоидальных Pc4 волн; б) MLT-L распределение тороидальных волн; в) MLT-L распределение компрессионных волн; г) MLT-L распределение волн со сменой поляризации.

Все наблюдаемые события Pc4 были найдены в околополуденных областях магнитосферы. Основными источниками дневных Pc4 считаются неустойчивости, например, дрейф-баунс неустойчивость, когда происходит передача энергии частиц волне. Исследование распределений концентраций заряженных частиц, взаимодействующих с Pc4 УНЧ-волнами, является предметом для дальнейшего изучения.

### Заключение

В данной работе получен ряд важных результатов:

1. Наиболее распространёнными среди волн диапазона Pc4 являются полоидальные волны с преобладанием радиальной компоненты магнитного поля.
2. Тороидальные, компрессионные волны и волны со сменой поляризации имеют сравнительные вероятности возникновения.
3. Волны Pc4 возникают в околополуденной области в окрестности плазмопаузы на L=5-6. Этот результат согласуется с более

ранними статистическими исследованиями спутниковых миссий AMPTEE, THEMIS и Van Allen Probes. В меньшем количестве волны Pc4 могут возникать также внутри и снаружи плазмопаузы.

**Благодарности.** Данная работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

### Литература

- Anderson, B.J., M.J. Engebretson, S.P. Rounds, L.J. Zanetti, and T.A. Potemra (1990), A statistical study of Pc 3-5 pulsations observed by the AMPTE/CCE magnetic fields experiment. I: Occurrence distributions, *J. Geophys. Res.*, 95, 10,495–10,523, doi:10.1029/JA095iA07p10495.
- Angelopoulos, V. (2008), The THEMIS mission, *Space Sci. Rev.*, 141, 5–34, doi:10.1007/s11214-008-9336-1.
- Chelpanov M.A., P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin, et al. (2016), Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 121, 2, 1315–1326.
- Dai L., K. Takahashi, R. Lysak, et al. (2015), Storm time occurrence and spatial distribution of Pc4 poloidal ULF waves in the inner magnetosphere: A Van Allen Probes statistical study, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 120, 6, 4748–4762.
- Kletzing, C.A., W.S. Kurth, M. Acuna, R.J. MacDowall, R.B. Torbert, T. Averkamp, et al. (2013), The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP, *Space Science Reviews*, 179, 127–181, <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>
- Kostarev D.V., P.N. Mager (2017), Drift-compression waves propagating in the direction of energetic electron drift in the magnetosphere, *Solar-Terr. Phys.* 3, 3, 18–27.
- Leonovich A.S., D.Yu. Klimushkin (2015), Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse smallscale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 120, 7, 5443–5454.
- Liu, W., T.E. Sarris, X. Li, S.R. Elkington, R. Ergun, V. Angelopoulos, J. Bonnell, and K.H. Glassmeier (2009), Electric and magnetic field observations of Pc4 and Pc5 pulsations in the inner magnetosphere: A statistical study, *J. Geophys. Res.*, 114, A12206, doi:10.1029/2009JA014243.
- Mager, P.N., O.S. Mikhailova, O.V. Mager, D.Y. Klimushkin (2018), Eigenmodes of the transverse Alfvénic resonator at the plasmapause: A Van Allen Probes case study, *Geophysical Research Letters*, 45, 10,796–10,804, <https://doi.org/10.1029/2018GL079596>.
- Takahashi, K., and B. J. Anderson (1992), Distribution of ULF energy ( $f$  is less than 80 mHz) in the inner magnetosphere-A statistical analysis of AMPTE CCE magnetic field data, *J. Geophys. Res.*, 97, 10,751–10,773, doi:10.1029/92JA00328.