

ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc4-5 ПОТОКАМИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ

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

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
katerina.smotrova@iszf.irk.ru

GENERATION OF GEOMAGNETIC PULSATIONS Pc4-5 BY ENERGETIC PARTICLES' FLUXES IN THE DAYSIDE MAGNETOSPHERE

E.E. Smotrova, O.S. Mikhailova, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
katerina.smotrova@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлен анализ наблюдения серии ультранизкочастотных (УНЧ) волн по данным спутника Van Allen Probe A. Событие наблюдалось 15 февраля 2014 г. на дневной стороне магнитосферы. Были зарегистрированы два типа колебаний. Первый представлял собой компрессионную УНЧ-волну с частотой около 2 мГц и амплитудой около 3 нТл. Второй — альфвеновскую волну на частоте около 6.5 мГц. Показано, что в компрессионная волна была сгенерирована в ходе дрейфового резонанса с электронами на энергии около 90 кэВ, а полоидальная волна — в ходе баунс-дрейфового резонанса с потоками протонов с энергией около 150 кэВ. Были определены параметры наблюдаемых волн, а также механизм их генерации.

Ключевые слова: УНЧ-волны, баунс-дрейфовый резонанс, энергичные частицы, магнитосфера

Abstract. We present an analysis of the observation of a series of ultra-low frequency (ULF) waves using data from the Van Allen Probe A satellite. The event was observed on February 15, 2014 on the dayside magnetosphere. Two types of ULF waves were registered. The first was compressional ULF wave with a frequency of about 2 mHz and an amplitude of about 3 nT. The second one was an Alfvén wave with a frequency of about 6.5 mHz. It is shown that the compressional wave was generated during drift resonance with electrons with about 90 keV, and the poloidal wave was generated during bounce-drift resonance with proton fluxes with energies in the range of 150 keV. The parameters of the observed waves and the mechanism of their generation were determined.

Keywords: ULF waves, drift-bounce resonance, energetic particles, magnetosphere

ВВЕДЕНИЕ

УНЧ-волны являются удобным средством диагностики магнитосферы, поскольку они взаимодействуют с энергичными заряженными частицами магнитосферы [McPherron, 2005]. Запуск большого количества спутниковых миссий позволяет изучать УНЧ-волны в разных частях магнитосферы Земли, в том числе волны диапазона Pc4-5 (4–600 с), которые часто наблюдаются на освещенной стороне магнитосферы [Anderson, 1992; Rubtsov et al., 2023].

Исследования частных случаев генерации УНЧ-волн показывают, что они чаще генерируются при взаимодействии с протонами [Min et al., 2017; Takahashi et al., 2018a, 2018b]. Случаев взаимодействия волн с электронами существенно меньше [Ren et al, 2017]. Ранее был показан случай резонансной генерации полоидальной УНЧ-волны диапазона Pc4 потоком электронов [Mikhailova et al, 2022]. Однако, экспериментально не было продемонстрировано похожих наблюдений, в которых происходила бы генерация электронами УНЧ-волн в диапазоне Pc5. В данном исследовании представлены первые результаты анализа экспериментального наблюдения резонансной генерации компрессионной Pc5 волны потоками электронов, после которой наблюдается резонансная генерация протонами полоидальной Pc4 волны.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ

Используя данные миссии Van Allen Probe A (RBSPA), было исследовано событие 15 февраля 2014 г. Событие было зарегистрировано на дневной стороне магнитосферы на расстоянии 5.2–5.8 R_E. Были зарегистрированы два вида колебаний (рис. 1a), наблюдавшиеся при спокойных геомагнитных условиях за пределами плазмосферы. За несколько часов была зарегистрирована суббурия (время onset около 13:30 UT), во время которой индекс AL достиг значения -250 нТл.

Первая волна наблюдается в период с 17:30 до 18:30 UT с максимальной амплитудой 3 нТл в компрессионной компоненте (рис. 1a). Согласно вейвлет-спектру колебания происходят в диапазоне Pc5, где частота плавно меняется от 1.65 до 2.4 мГц (рис. 1b).

Вторая волна наблюдается с 18:15 до 19:00 UT с максимальной амплитудой в 5 нТл в радиальной и азимутальной компонентах магнитного поля (рис. 1a). Волна имеет смешанную поляризацию с максимумом на частоте около 6.5 мГц в радиальной компоненте, что относится к диапазону Pc4 (рис. 1b). Поскольку в это время компрессионная компонента значительно слабее остальных, можно сделать вывод, что мы наблюдаем альфвеновскую волну. Сопоставление собственных альфвеновских тороидальных частот с наблюдаемым спектром показало, волна представляет вторую гармонику альфвеновской волны.

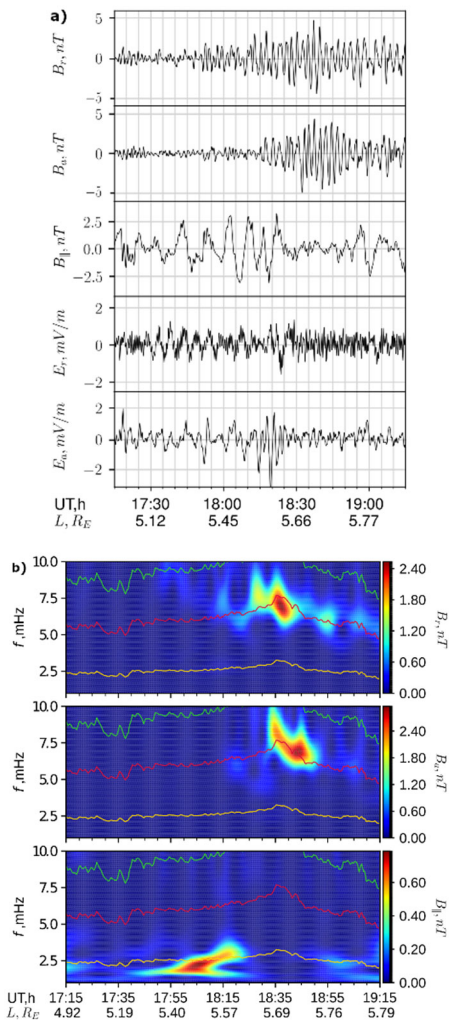


Рис. 1. Данные спутника RBSPA: а) — колебания в магнитном и электрическом полях: сверху вниз — радиальная, азимутальная и продольная компоненты магнитного поля, радиальная и азимутальная компоненты электрического поля, б) — вейвлет-спектр магнитного поля, цветными линиями указаны 1, 2 и 3 гармоник тороидальной волны с массовым числом $\mu = 4$

КОЛЕБАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Нами были зарегистрированы модулированные потоки энергичных электронов и протонов, наблюдавшиеся одновременно с компрессионной и альфвеновской волнами соответственно.

Сопоставление компрессионной Pc5 компоненты с осцилляциями в потоках электронов показало, что резонансная энергия находится между каналами 86.7 и 92.3 кэВ (рис. 2а). Частота колебаний составляет около 1.65 мГц. Максимальная амплитуда колебаний фиксировалась у частиц с питч-углами 90° , что соответствует дрейфовому резонансу с фундаментальной гармоникой. Оценку азимутального волнового числа можно определить из условия баунс-дрейфового резонанса [Southwood, Kivelson, 1982]:

$$\omega - k\omega_b - m\omega_d = 0, \quad (1)$$

где ω — частота волны, m — азимутальное волновое число, k — баунс-гармоника, ω_b и ω_d — угловые частоты баунс-колебаний и магнитного дрейфа частиц, усредненная по баунс-периоду. Дрейфовый резонанс является частным случаем баунс-

дрейфового резонанса, когда баунс гармоника $k = 0$. В таком случае, исходя из (1), было получено значение $m = 12$. Волна является азимутально-крупномасштабной, распространяющейся на восток.

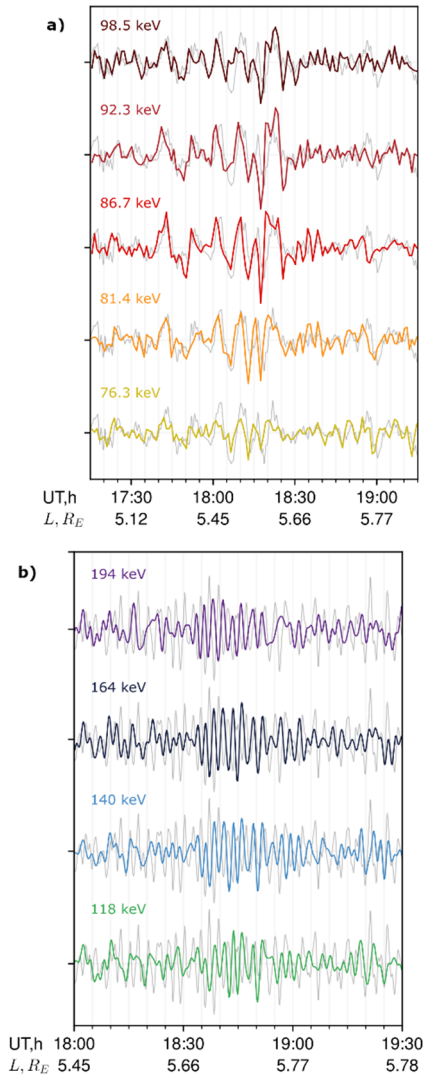


Рис. 2. а) — осцилляции в потоках электронов с инструмента RBSPICE, б) — осцилляции в потоках протонов с инструмента MAGEIS

В осцилляциях протонов были обнаружены колебания, совпадающие по частоте с наблюдаемой Pc4 волной. Распределение частиц по питч-углам указывает на то, что протоны находятся в баунс-дрейфовом резонансе с УНЧ-волной. При этом резонансная энергия порядка 150 кэВ. Оценка азимутального волнового числа из (1) указывает на два возможных азимутальных волновых числа: -230 ($k = -1$) и 180 ($k = 1$). Обе волны являются азимутально-мелкомасштабными, но распространяющиеся в противоположных направлениях.

О МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Для возможности передачи энергии от частиц к волне, необходимо наличие инверсной функции распределения по энергии или сильного радиального градиента функции распределения [Southwood et al., 1969]. Развитие подобной неустойчивости выполняется при условии:

$$\hat{Q}F = \left[\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} + \frac{m}{\omega} \frac{c}{qV_{eq}L} \frac{\partial F}{\partial L} \right]_{\varepsilon_{res}} > 0. \quad (2)$$

В данном случае F — функция распределения, ε — энергия частиц, q — заряд частицы, c — скорость света, V_{eq} — магнитное поле на геомагнитном экваторе, L — параметр МакИлвейна, ε_{res} — резонансная энергия. Для определения возможного механизма генерации по спутниковым данным было проведено вычисление данного коэффициента неустойчивости для компрессионной УНЧ-волны Pc5 и для полоидальной альфвеновской волны Pc4.

В момент наблюдения компрессионной волны в магнитосфере наблюдалось инверсное распределение частиц по скоростям в пределах энергий 80–100 кэВ. Однако, больший вклад в генерацию данной волны внес сильный пространственный градиент функции распределения.

В случае полоидальной альфвеновской волны показано, что наблюдаемые колебания в радиальном магнитном поле действительно могут быть суперпозицией двух волн с одинаковой частотой, но разным азимутальным волновым числом. Если для волны с отрицательным m основным механизмом генерации являлась пространственная градиентная неустойчивость, то для волны с положительным m дополнительный вклад внесло также инверсное распределение частиц по скоростям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами было проведено исследование события по данным спутника Van Allen Probe A, во время которого наблюдалась серия УНЧ-волн на дневной стороне магнитосферы.

Первая волна представляла собой первую гармонику компрессионной волны с переменной частотой в диапазоне от 1.65 до 2.4 мГц. Волна находилась в дрейфовом резонансе с потоком электронов с энергией 90 кэВ на частоте 1.65 мГц. Из теории баунс-дрейфового резонанса найдено азимутальное волновое число $m = 12$, что означает азимутально-крупномасштабную волну, распространяющуюся на восток. Волна генерировалась пространственной градиентной неустойчивостью.

Вторая волна являлась второй гармоникой альфвеновской волны смешанной поляризации с частотой 6.5 мГц. Было показано, что волна находилась в баунс-дрейфовом резонансе с протонами с энергией около 150 кэВ. Оценка азимутального

волнового числа показывает возможность присутствия двух волн с $m = -230$ ($k = -1$) и $m = 180$ ($k = 1$). Оценка условий генерации подтверждает возможное наличие двух волн. Обе волны сгенерированы преимущественно пространственной градиентной неустойчивостью, однако для второй волны дополнительный вклад в генерацию вносит инверсное распределение частиц по скоростям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anderson B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 1. Equatorial occurrence distributions // *J. Geophys. Res.* 1992. P. 3075–3088. DOI: 10.1029/91JA02706
- McPherron R.L. Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity // *Surveys in Geophysics*. 2005. V. 26. P. 545–592. DOI: 10.1007/s10712-005-1758-7
- Mikhailova O.S., Smotrova E. E., Mager P.N. Resonant generation of an Alfvén wave by a substorm injected electron cloud: A Van Allen probe case study // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2022GL100433. DOI: 10.1029/2022GL100433
- Min K., Takahashi K., Ukhorskiy A.Y. et al. Second harmonic poloidal waves observed by Van Allen Probes in the dusk-midnight sector // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, iss. 3. P. 3013–3039. DOI: 10.1002/2016JA023770
- Ren J., Zong Q.G., Zhou X.Z. et al. Phase relationship between ULF waves and drift-bounce resonant ions: A statistical study // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 7087–7096. DOI: 10.1002/2016JA023848
- Rubtsov A. V., Nosé M., Matsuoka A. et al. Polarization and spatial distribution features of Pc4 and Pc5 waves in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. 128. e2023JA031674. DOI: 10.1029/2023JA031674
- Southwood D.J., Kivelson M.G. Charged particle behavior in low-frequency geomagnetic pulsations. 2. Graphical approach // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 1707–1710. DOI: 10.1029/JA087iA03p01707
- Southwood D.J., Dungey J.W., Etherington R.J. Bounce Resonant interactions between pulsations and trapped particles // *Planetary and Space Sci.* 1969. V. 17. P. 349–361. DOI: 10.1016/0032-0633(69)90068-3
- Takahashi K., Claudepierre S.G., Rankin R. et al. Van Allen probes observation of a fundamental poloidal standing Alfvén wave event related to giant pulsations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018a. V. 123. P. 4574–4593. DOI: 10.1029/2017JA025139
- Takahashi K., Oimatsu S., Nosé M. et al. Van Allen probes observations of second harmonic poloidal standing Alfvén waves // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018b. V. 123. P. 611–637. DOI: 10.1002/2017JA024869