

КОМПРЕССИОННАЯ Pc5-ВОЛНА В ВЕЧЕРНЕМ СЕКТОРЕ МАГНИТОСФЕРЫ, НАБЛЮДАВАШАЯСЯ СПУТНИКАМИ THEMIS

^{1,2}А.В. Рубцов, ³О.В. Агапитов, ¹П.Н. Магер, ¹Д.Ю. Климушкин, ¹О.В. Магер

¹Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия
avrubcov@mail.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Калифорнийский университет, Беркли, США

COMPRESSIONAL Pc5 WAVE IN THE DUSK SIDE MAGNETOSPHERE OBSERVED BY THEMIS SPACECRAFT

^{1,2}A.V. Rubtsov, ³O.V. Agapitov, ¹P.N. Mager, ¹D.Yu. Klimushkin, ¹O.V. Mager

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
avrubcov@mail.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Space Science Laboratory, University of California, Berkeley, CA, USA

Аннотация. В работе исследуется компрессионная Pc5 волна, которая наблюдалась 21 мая 2007 г. пятью спутниками THEMIS в вечернем секторе магнитосферы Земли на $L \approx 10 R_E$. Наблюдениям предшествовали две последовательные суббури, сформировавшие облако заряженных частиц из низкоэнергичных протонов первой и высокоэнергичных протонов второй. Обнаружено преимущественно полоидальное возмущение поперечной составляющей магнитного поля, соответствующее азимутальному направлению волнового вектора. Частота волны оказалась в 2 раза ниже, чем собственная частота альфвеновской волны для данных L -оболочек. Увеличение энергии частиц при удалении от Земли и сильная зависимость частоты волны от азимутального волнового числа составляют условия для градиентной неустойчивости дрейфово-компрессионной моды. В результате сделан вывод, что наблюдавшаяся волна являлась дрейфово-компрессионной модой, порожденной градиентной неустойчивостью.

Ключевые слова: магнитосфера, УНЧ-волны, дрейфово-компрессионная мода, THEMIS.

Abstract. A compressional Pc5 wave observed by the five THEMIS satellites in the dusk sector of terrestrial magnetosphere at $L \approx 10 R_E$ on 21 May 2007 was investigated. The observations were preceded by two consecutive substorms that formed the cloud of charged particles comprises of the low-energy protons from the first substorm and high-energy protons from the second one. Primary poloidal perturbation of transverse component of the magnetic field corresponding to azimuthal wave vector direction was found. The wave frequency was found to be 2 times lower than Alfvén wave eigenfrequency on the same L -shells. The increase of the particle energy with the distance from the Earth and strong dependence of wave frequency on the azimuthal wave number constituents conditions for the gradient instability of the drift-compressional mode. As the result, it's concluded that the observed wave was the drift-compressional mode generated by the gradient instability.

Keywords: magnetosphere, ULF waves, drift-compressional mode, THEMIS.

ВВЕДЕНИЕ

Длиннопериодические (5–10 мин) ультранизкочастотные (УНЧ) Pc5 волны в магнитосфере Земли постоянно наблюдаются с помощью магнетометров, радаров и спутников. Они искусственно делятся на два типа: азимутально крупно- и мелкомасштабные волны [Dai et al., 2015; Leonovich, Klimushkin, 2015]. Обычно считается, что мелкомасштабные волны (азимутальное волновое число $m \gg 1$) вызываются неустойчивыми популяциями частиц внутри магнитосферы [Dai et al., 2013]. Отдельным видом волн с большим m являются компрессионные Pc5 возмущения во время бурь [Barfield, McPherron, 1978], которые обычно имеют частоты меньше, чем характерные альфвеновские частоты [Agapitov, Cheremnykh, 2011]. Текущие радарные наблюдения указывают, что эти волны могут быть дрейфово-компрессионными модами (ДКМ) [Chelpanov et al., 2016]. ДКМ могут возбуждаться в горячей неоднородной плазме из-за резонансного взаимодействия с энергичными частицами [Crabtree et al., 2003; Kostarev, Mager, 2017] или через сцепление со сдвиговой альфвеновской модой [Mager, Klimushkin, 2017].

С точки зрения наблюдений имеется три основных различия между ДКМ и альфвеновской модами. Во-первых, период ДКМ больше, чем у альфвенов-

ской моды на той же L -оболочке. Во-вторых, в отличие от ДКМ, альфвеновская частота слабо зависит от азимутального волнового числа m . В-третьих, обе моды могут быть вызваны градиентной неустойчивостью, но при противоположных условиях: альфвеновская мода возбуждается при отрицательном градиенте температуры [Southwood, 1976], а ДКМ — при положительном [Mager et al., 2013].

В данной работе исследовалось волновое событие, наблюдавшееся одновременно пятью спутниками миссии THEMIS 21 мая 2007 г. Были рассмотрены данные измерений магнитного поля и параметров плазмы и проведен их спектральный анализ. Были изучены пространственная структура волны и взаимодействия волны с частицами.

ОПИСАНИЕ ВОЛНОВОГО СОБЫТИЯ

Спутники миссии THEMIS (ТНА, ТНВ, ТНС, ТНД, ТНЕ) одновременно наблюдали УНЧ-волну с ~03:30 до ~04:10 UT 21 мая 2007 г. Все они находились около геомагнитного экватора в вечернем секторе магнитосферы на $L \approx 10 R_E$ и приближались к Земле по почти одинаковым орбитам друг за другом. Группа из близкорасположенных спутников ТНВ, ТНС и ТНД опережала ТНА и ТНЕ на ~2 R_E (рис. 1, слева).

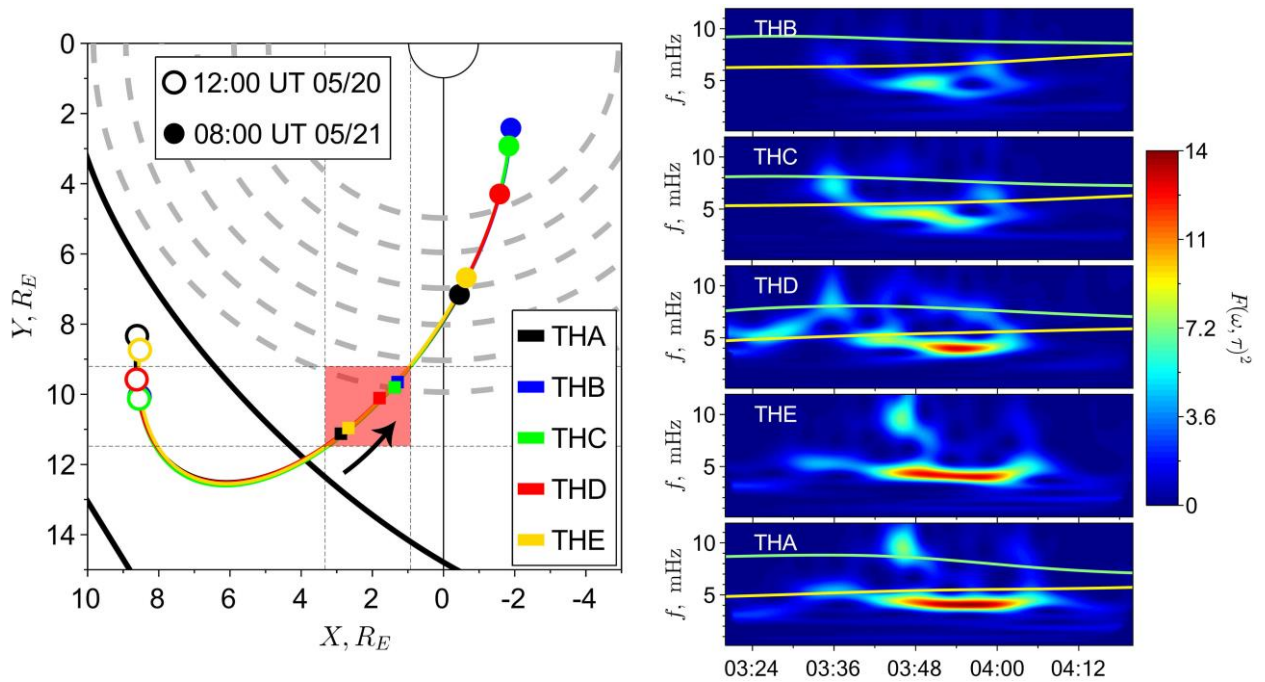


Рис. 1. Траектории движения спутников THEMIS с 12:00 UT 20 мая (пустые круги) по 08:00 UT 21 мая (закрашенные круги) 2007 г. в плоскости XY системы координат GSE (слева). Красным квадратом показана область, в которой наблюдалась волна. Черные линии обозначают ударную волну и магнитопаузу. (справа) Динамические спектры продольной компоненты возмущения магнитного поля на спутниках THB, THC, THD, THE, THA (в порядке удаления от Земли) и вычисленные тороидальная (нижняя желтая линия) и полюидальная (верхняя зеленая линия) собственные частоты фундаментальной гармонике альфвеновской волны, кроме THE

Наибольшее возмущение испытывала компонента магнитного поля вдоль силовых линий (компрессионная). В поперечной плоскости доминирующей составляющей оказалась полюидальная компонента. Установлено, что колебания продольной компоненты магнитного поля происходили в противофазе с осцилляциями давления плазмы. Применяя вейвлет-анализ, были построены динамические спектры волны (рис. 1, справа), по которым определено, что ее частота изменялась в диапазоне от 3 до 5 мГц, т. е. области Pc5 пульсаций. Такие возмущения часто ассоциируют с полюидальными альфвеновскими волнами, поэтому были проведены вычисления собственных частот альфвеновской моды на основе данных параметров плазмы. Результаты вычислений показаны на рис. 1, справа желтой и зеленой линиями. Видно, что частота волны оказалась значительно ниже, чем собственные частоты альфвеновских мод, что характерно для ДКМ. Таким образом, мы заключили, что наблюдаемая волна является ДКМ с сильной полюидальной составляющей.

Волна наблюдалась на фоне низкой геомагнитной активности. Однако по данным авроральных индексов произошло увеличение суббуревой активности. В 01:18 и 03:14 UT зафиксированы две суббури. Позже, но также с интервалом в 2 ч дважды произошло увеличение потока протонов. Причем высокоэнергичные протоны от второй суббури догнали низкоэнергичные протоны от первой к моменту обнаружения волны в ~03:30 UT (рис. 2, а) и образовали облако плазмы. Построив кросс-спектры продольной компоненты возмущения магнитного поля и потока протонов было определено, что

наибольшая модуляция потока наблюдается для частиц с энергией 25 кэВ. Увеличение потока протонов привело к увеличению давления плазмы, а также параметра β , который достиг значения 0.5.

По данным давления плазмы, были определены некоторые параметры облака: скорость в азимутальном направлении составила $\sim 2^\circ/\text{мин}$, а азимутальный размер — 75° (или $14 R_E$). Такая скорость соответствует скорости дрейфа протонов с энергией 25 кэВ. Радиальный масштаб пространственной вариации температуры, $\kappa_T = T^{-1} \partial T / \partial \rho$, оказался положительным (рис. 2, б). Используя близкое расположение спутников THB, THC и THD, сдвиг фазы волны между ними оказался меньше половины периода, были вычислены компоненты волнового вектора. Однако наибольший интерес представляет значение азимутального волнового числа m , изменявшееся от -60 до -15 . Оказалось, что зависимость частоты волны от m близка к линейной, с коэффициентом корреляции ~ 0.97 (рис. 2, в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В вечернем секторе магнитосферы Земли 21 мая 2007 г. с ~03:30 до ~04:10 UT спутниками миссии THEMIS наблюдалась компрессионная полюидальная УНЧ Pc5-волна. Область обнаружения волны находилась внутри облака плазмы, образовавшегося в результате инжекции частиц после двух последовательных суббурь. Определено, что данная волна является ДКМ, вызванной дрейфовым резонансом.

В работе использовались данные инструментов FGM, ESA и SST спутников миссии THEMIS с сайта CDAWeb [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>].

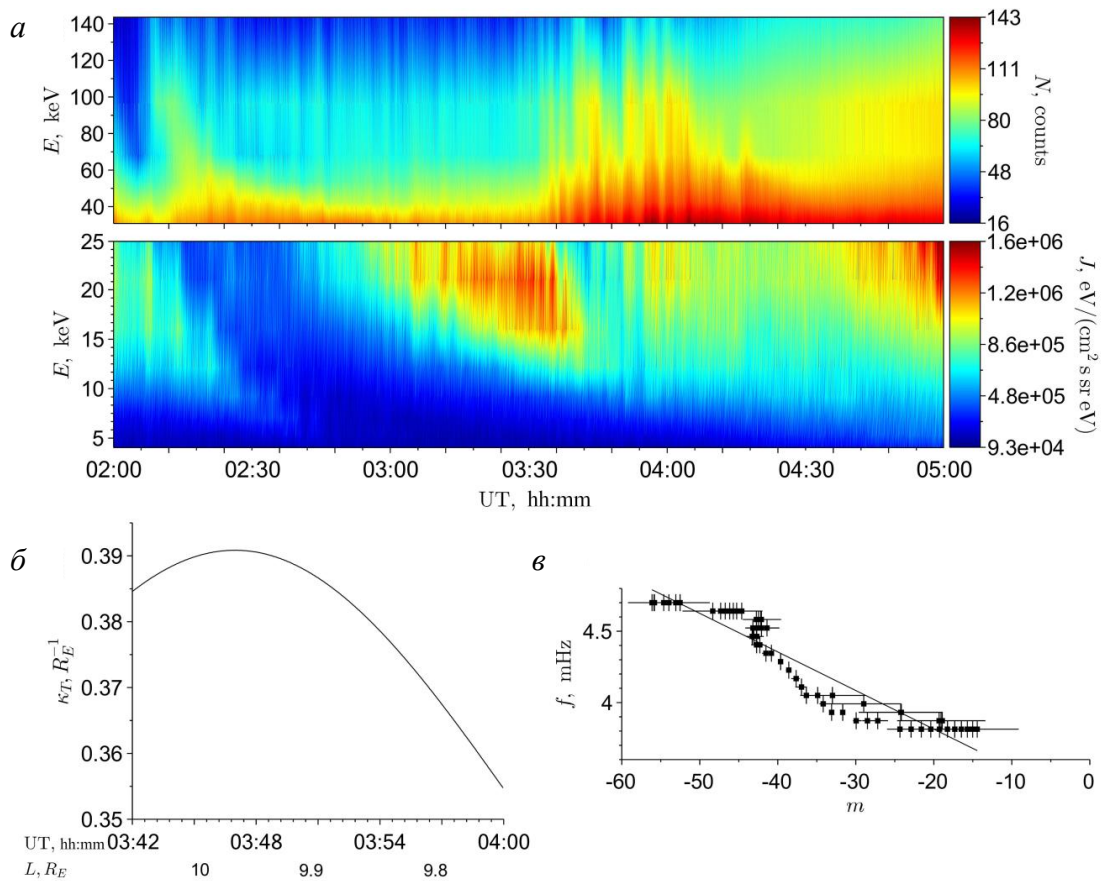


Рис. 2. Дифференциальный энергетический поток протонов по данным инструмента ESA (4–25 кэВ) и отсчеты детектора инструмента SST (30–143 кэВ) со спутника THС (а). Эволюция радиального градиента температуры плазмы κ_T по данным THС (б). Зависимость частоты волны f от азимутального волнового числа m (в). Квадраты обозначают полученные значения, а прямая линия — модель линейной регрессии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agapitov A.V., Cheremnykh O.K. Polarization of ULF waves in the Earth's magnetosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2011. V. 27, iss. 3. P. 117–123.

Barfield J.N., McPherron R.L. Stormtime Pc 5 magnetic pulsations observed at synchronous orbit and their correlation with the partial ring current // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83, I. A2. P. 739–743.

Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., et al. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, iss. 2. P. 1315–1326.

Crabtree C., Horton W., Wong H.V., van Dam J.W. Bounce-averaged stability of compressional modes in geotail flux tubes // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 208, iss. A2. P. 1084.

Dai L., Takahashi K., Wygant J.R., et al. Excitation of poloidal standing Alfvén waves through drift resonance wave-particle interaction // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, iss. 16. P. 4127–4132.

Dai L., Takahashi K., Lysak R., et al. 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. 2015. V. 120, iss. 6. P. 4748–4762.

Kostarev D.V., Mager P.N. Drift-compression waves propagating in the direction of energetic electron drift in the magnetosphere // *Solar-Terr. Phys.* 2017. V. 3, N 3. P. 18–27.

Leonovich A.S., Klimushkin D.Yu. Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120, iss. 7. P. 5443–5454.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. Drift-compressional modes generated by inverted plasma distributions in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, iss. 8. P. 4915–4923.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Non-resonant instability of coupled Alfvén and drift compressional modes in magnetospheric plasma // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2017. V. 59, N 9. P. 095005.

Southwood D.J. A general approach to low-frequency instability in the ring current plasma // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81, iss. 19. P. 3340–3348.

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 30.04.2019).