

**УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОМПРЕССИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ.
АНАЛИЗ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ THEMIS**

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

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СЦ РАН, Иркутск, Россия
avrubcov@mail.ru

**ULTRA-LOW-FREQUENCY COMPRESSIONAL OSCILLATIONS IN THE MAGNETOSPHERE.
DATA ANALYSIS OF THE THEMIS SATELLITE SYSTEM**

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

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Исследована компрессионная пульсация Pc5 со значительной полоидальной компонентой, обнаруженная в данных спутниковой системы THEMIS. Были построены динамические спектры и вычислены параметры пульсации, определены параметры среды. По найденным параметрам среды была смоделирована частота фундаментальной гармоники стоячей альфвеновской волны. Было показано, что наблюдаемая частота пульсации близка к альфвеновской частоте. Таким образом, сделан вывод, что наблюдаемая волна является альфвеновской.

Ключевые слова: плазма, магнитогидродинамика, альфвеновские волны, магнитосфера.

Abstract. The compressional Pc5 pulsation with a significant poloidal component found in the THEMIS data was investigated. Dynamic spectra were plotted and the parameters of pulsation as well as the parameters of the environment were determined. Based on the found parameters of the environment, the frequency of the fundamental harmonic of the standing Alfvén wave was simulated. It was shown that the observed pulsation frequency is close to the Alfvén frequency. Thus, it was concluded that the observed wave is the Alfvén mode.

Keywords: plasma, magnetohydrodynamics, Alfvén waves, magnetosphere.

Введение

На сегодняшний день в магнитосфере зарегистрировано большое количество разнообразных альфвеновских волн. Они подразделяются на колебания с коротким и длинным периодом. Длиннопериодические пульсации принято разделять на азимутально крупномасштабные (азимутальное волновое число $m \sim 1$) и мелкомасштабные ($m \gg 1$) волны. Физическим обоснованием такого разделения является различие в источниках этих двух типов волн: альфвеновские колебания с малым m обычно генерируются магнитозвуковой волной, пришедшей с внешней границы магнитосферы, а волны с большим m – от источников внутри магнитосферы [Glassmeier, 1995]. Также длинопериодические гидромагнитные волны в магнитосфере классифицируются в соответствии с преобладающей поляризацией [Anderson et al., 1990]: азимутально (тороидально) поляризованные, радиально (полоидально) поляризованные и компрессионные, если имеется значительное изменение модуля магнитного поля. Волны с большим m обычно отождествляются с полоидальными альфвеновскими волнами, генерируемыми внутренними магнитосферными процессами или переменными токами инжектированных суббурями частиц. Такие волны доступны для экспериментального изучения с помощью спутников.

В данной работе представлен анализ возмущения магнитного поля, зафиксированного спутниками системы THEMIS около 4:00 UTC 21 мая 2007 г.

Было выдвинуто предположение, что наблюдаемое возмущение является альфвеновской волной. Для его проверки были вычислены частота и альфвеновская скорость, а также рассмотрены спектр дифференциального энергетического потока ионов, их концентрация и давление плазмы. В качестве дополнительной проверки было проведено моделирование собственных частот фундаментальной гармоники тороидальной и полоидальной мод альфвеновской волны по известным параметрам среды с использованием дипольной модели магнитосферы и приближений однородной холодной и горячей плазмы.

Вычисление параметров пульсации и среды

THEMIS является системой из 5 идентичных по конструкции спутников, запущенной в феврале 2007 г. Каждый спутник оборудован инструментами для измерения магнитного поля и параметров потоков ионов с энергией от 5 эВ до 25 кэВ. 21 мая 2007 г. спутники находились в окрестности магнитной оболочки $L=10 R_E$. Незадолго до обнаружения возмущения спутник E перестал записывать данные параметров потоков частиц, поэтому все вычисления и анализ производились для четырёх спутников. Для удобства последующей работы был осуществлен переход в систему координат, ориентированную по магнитному полю. Одна ось этой системы направлена вдоль силовой линии, а остальные в азимутальном и радиальном направлениях. Резуль-

тат такого перехода продемонстрирован на рис. 1 (здесь и далее на рисунках представлены графики со спутника А, графики со спутников В, С и D выглядят аналогично), где изображены компоненты высокочастотной части вектора магнитного поля и на интервале от 3.7 до 4.1 ч, видно возмущение. Отметим, что оно больше в продольном направлении, чем в двух других.

Одной из характерных величин альфвеновских волн является частота пульсации порядка единиц мГц. Для вычисления частоты возмущения мы использовали дискретное вейвлет-преобразование, где в качестве вейвлет-функции взяли вейвлет Морле [Foster, 1996]. Построенные динамические спектры (рис. 2) показали, что наблюдаемой волне соответствует диапазон частот от 3 до 6 мГц, а период этих колебаний, 170–330 с, соответствует диапазону регулярных пульсаций Pc5.

Второй характерной величиной альфвеновских волн является альфвеновская скорость порядка 1000 км/с. Она вычислялась по известным данным магнитного поля и концентрации ионов: $v_A = B / \sqrt{4\pi\rho}$. Но инструменты спутников имеют ограничение на минимальную энергию ионов и для учёта вклада множества холодных частиц была проведена экстраполяция данных концентрации, что привело к уменьшению альфвеновской скорости до диапазона 1000–1400 км/с.

Далее была проведена проверка, является ли обнаруженная волна компрессионной, и что стало ее источником. Мы сравнили продольную компоненту вектора магнитного поля и плазменное давление. Полосовым фильтром был выделен диапазон частот, определенный ранее по динамическому спектру, а величины нормированы на единицу. На рис. 3 видно противофазное изменение этих параметров, что является характерной чертой компрессионных пульсаций Pc5, к которым относится наблюдаемая волна [Меликян и др., 2013].

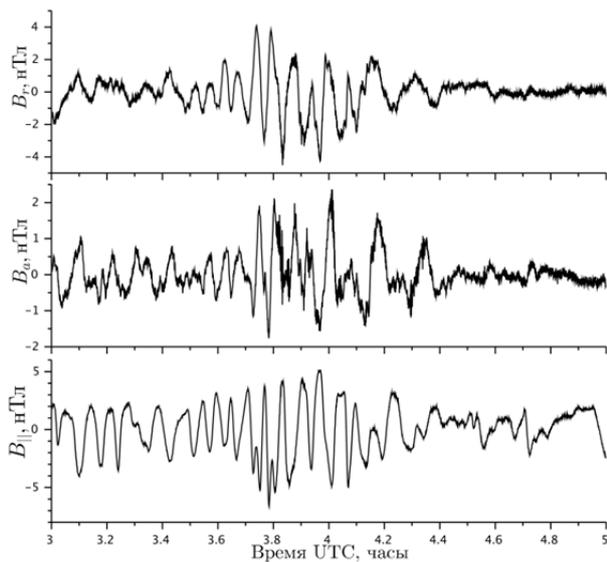


Рис. 1. Высокочастотная часть вектора магнитного поля со спутника А. Компоненты в новой системе координат: B_r — радиальная, B_θ — азимутальная, B_\parallel — продольная

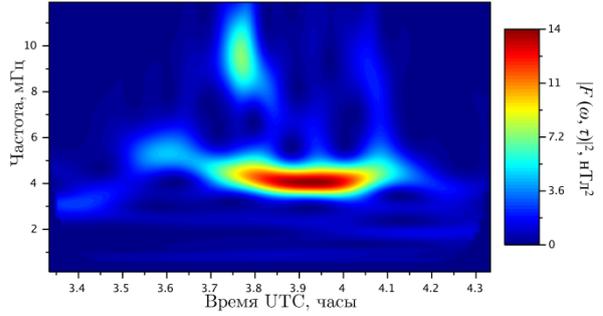


Рис. 2. Спектр продольного магнитного поля со спутника А. $F(\omega, \tau)$ — амплитудная вейвлет-функция

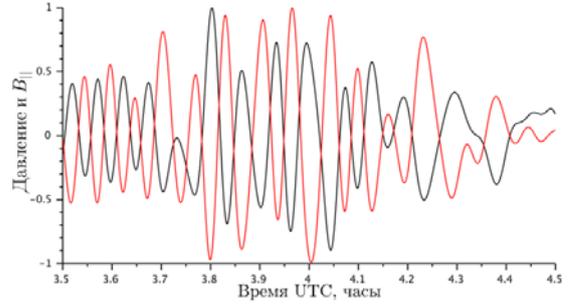


Рис. 3. Продольная компонента вектора магнитного поля (красная кривая) и плазменное давление (черная кривая) по данным спутника А

На энергетическом спектре дифференциального энергетического потока ионов (рис. 4, а) видна инжекция частиц с высокой энергией перед моментом обнаружения волны в виде красного пятна, а также последующая модуляция частиц. В это же время произошло увеличение давления (рис. 4, б) и величины β (рис. 4, в), которая достигает сравнительно высокого значения 0.5. Предположительно, впрыск частиц произошло в виде облака. Оценка скорости облака в азимутальном направлении показала значение 2 °/мин и направление его движения — на запад, а размер в азимутальном направлении составил 72°. Считая вычисленную скорость облака дрейфовой скоростью частиц, была проведена оценка их энергии [Roederer, 1970] и полученная величина энергии (25 кэВ) оказалась близка энергии инжектированных частиц.

Модель собственных частот альфвеновской волны

Проведенные вычисления и анализ оказались очень оптимистичными, поэтому дополнительным этапом было решено провести моделирование собственных частот фундаментальной гармоники тороидальной и полоидальной мод альфвеновской волны при известных параметрах среды. Задачей являлось не точное моделирование магнитосферы, а приблизительная оценка значений, поэтому была использована дипольно-подобная модель и приближения однородной холодной и горячей плазмы. Исходные уравнения для данной модели содержали производную по продольной оси, но для удобства вычислений был осуществлен переход к производной по геомагнитной широте θ . Соответственно уравнения модели преобразовались в следующие дифференциальные уравнения второго порядка:

$$\left(\frac{v_A^2}{h_\theta^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{v_A^2}{h_\theta} \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{h_\theta} \sqrt{\frac{g_2}{g_1}} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} + \omega^2 \right) F_T = 0,$$

$$\left(\frac{v_A^2}{h_\theta^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{v_A^2}{h_\theta} \sqrt{\frac{g_2}{g_1}} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{h_\theta} \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} + \omega^2 - v_A^2 \frac{2\beta}{R^2} \left(\frac{R}{2P} \frac{dP}{dL} + \gamma \right) \right) F_P = 0,$$

где F_T и F_P — функции тороидальной и полоидальной моды; g_i — коэффициенты метрического тензора; R — радиус кривизны силовой линии; P — плазменное давление; β — отношение плазменного давления к магнитному; γ — постоянная адиабаты; ω — собственная частота [Klimushkin et al., 2004]. Произ-

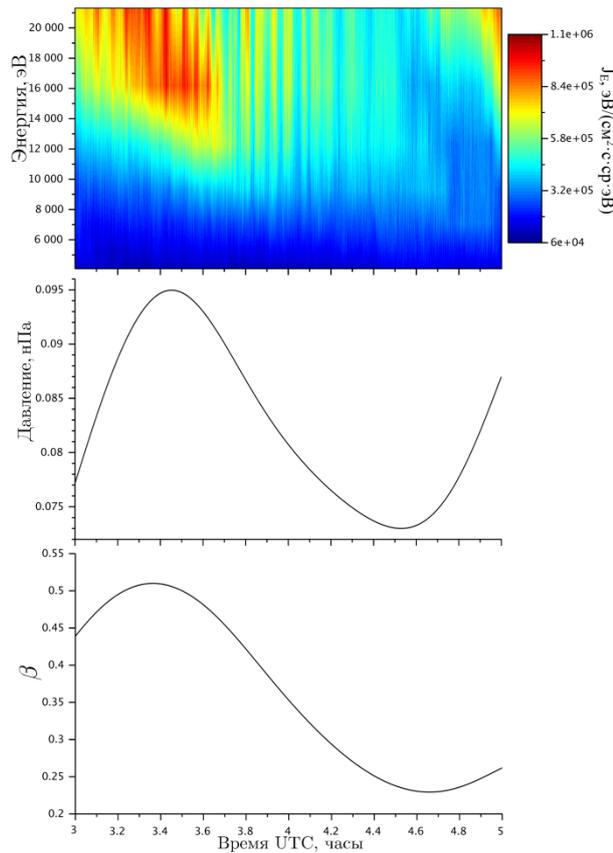


Рис. 4. Параметры со спутника А: (а) энергетический спектр дифференциального энергетического потока ионов J_E , (б) плазменное давление, (в) величина β

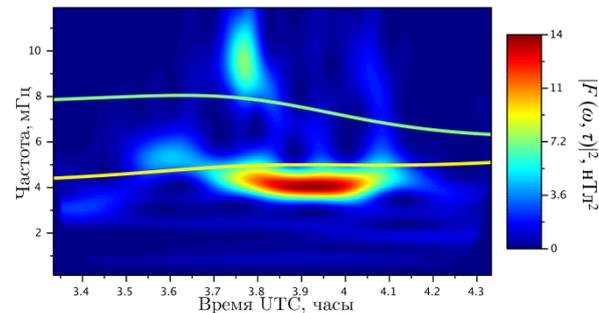


Рис. 5. Собственные частоты фундаментальной гармоники тороидальной (желтая) и полоидальной (зеленая) мод альфвеновской волны в горячей однородной плазме, наложенные на динамический спектр продольного магнитного поля со спутника А

водные вычислялись с помощью формул приближенного вычисления, а градиент давления рассчитывался по методу наименьших квадратов.

На рис. 5 полученные значения собственных частот фундаментальной гармоники тороидальной и полоидальной мод, для большей наглядности, наложены на ранее построенные спектры. Видно, что значения альфвеновской частоты близки к частоте возмущения, однако более правильным было бы расположение волны линиями тороидальной и полоидальной мод. Эта погрешность объясняется неточностью использовавшейся модели магнитосферы, но она не оказывает существенного влияния на интерпретацию результата.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных вычислений и анализа данных, можно утверждать, что событие, зафиксированное спутниками системы THEMIS около 4:00 UTC 21 мая 2007 г., является альфвеновской компрессионной волной со значительной полоидальной компонентой, которая была порождена облаком частиц с высокой энергией около 20 кэВ. В работе использовались данные спутниковой системы THEMIS с сайта CDAWeb (<http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>). В частности, данные ESA (ответственные: V. Angelopoulos C.W. Carlson J. McFadden), FIT и STATE (ответственный: V. Angelopoulos).

Данная работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-05-00254.

Список литературы

Меликян К.А., Пилипенко В.А., Козырева О.В. Пространственная структура Pc5 волн во внешней магнитосфере по наблюдениям на спутниках THEMIS // Косм. иссл. 2013. Т. 51, № 3. С. 179–190.

Anderson B.J., Engebretson M.J., Rounds S.P., et al. A statistical study of Pc 3–5 pulsations observed by the AMPTE/CCE magnetic fields experiment, 1, Occurrence distributions // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 10495–10523.

Foster G. Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series // Astron. J. 1996. V. 112, N 4. P. 1709–1729.

Glassmeier K.-H. ULF pulsations // Handbook of Atmospheric Electrodynamics. 1995. V. II. P. 463–502.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Glassmeier K.-H. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wave numbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 267–288.

Roederer J.G. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Springer-Verlag, New York, 1970.

Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. California Technical Publishing, 1999.