

УДК 550.385.37

# ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ВНЕЗАПНОГО ИМПУЛЬСА И НАЧАЛА СУББУРИ В УТРЕННЕМ СЕКТОРЕ МАГНИТОСФЕРЫ 4 ЯНВАРЯ 2001 г.

Н.А. Золотухина

## WAVE EFFECTS OF SUDDEN IMPULSE AND SUBSTORM ONSET IN THE MAGNETOSPHERE MORNING SECTOR ON 4 JANUARY 2001

N.A. Zolotukhina

Выполнен сравнительный анализ УНЧ-волн, зарегистрированных после внезапного импульса (SI) и последовавшего за ним начала суббури (SO) спутниками «Cluster» на расстояниях  $L \sim 4$  от центра Земли. Показано, что в экваториальной утренней магнитосфере оба указанных явления активизировали колебания магнитного поля с периодами от 40 до 200 с. Обнаружено, что колебания, сопровождавшие SI и SO, имели сходный спектральный состав, но различались поляризацией. Наиболее ярко поляризационные различия проявились в области главного спектрального максимума (100–130 с), где переход от SI к SO сопровождался сменой направления вращения вектора возмущения магнитного поля и переориентацией поляризационного эллипса колебаний.

A comparative analysis of ELF-waves registered after sudden impulse (SI) and the following substorm onset (SO) by satellites Cluster at distances  $L \sim 4$  from the Earth's centre was made. It was shown that both phenomena mentioned above activated magnetic field oscillations of periods from 40 to 200 s. Oscillations followed SI and SO were found to be of a similar spectral composition but different polarizations. Differences in polarization became well-pronounced in a range of the main spectral maximum (100–130 s) where the transition from SI to SO was accompanied by change in direction of rotation of magnetic field disturbance vector and by reorientation of oscillation polarization ellipse.

### Введение

Известно, что резкое нарушение энергетического баланса магнитосферы, происходящее во время внезапного импульса (SI) или начала суббури (SO), сопровождается широкополосным всплеском геомагнитных пульсаций, относимых к типам P11–P13 [Пудовкин и др., 1976; Нишида, 1980]. Следовательно, эти два различных физических процесса могут возбуждать одни и те же волновые моды, в частности альфвеновские колебания магнитосферы [Троицкая, Гульельми, 1969; Allan, et al., 1997; Olson, 1999; Золотухина, 2009]. Поскольку первичные источники быстрых магнитозвуковых волн, возбуждающих, как принято считать, альфвеновские резонаторы, расположены в событиях SI и SO вблизи противоположных (полуночного SI и полуденного SO) меридианов, во внутренней магнитосфере эти волны распространяются в противоположных (антисолнечном и солнечном) направлениях. Следует ожидать, что в каждой точке внутренней магнитосферы направление вращения вектора возмущения магнитного поля альфвеновских волн, возбуждаемых суббуревым взрывом, должно быть обратно тому, которое наблюдается при генерации волн неоднородностями солнечного ветра [Southwood, 1974]. Покажем это на примере УНЧ-волн, зарегистрированных тремя спутниками «Cluster» (C1, C3 и C4) 4 января 2001 г.

### Условия в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли

На рис. 1 представлена информация, позволяющая судить об изменениях условий на границе магнитосферы и уровня геомагнитной возмущенности. Спутниковые данные получены на сайте [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public), сведения о вариациях индексов геомагнитной активности – на сайте <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>. Данные спутника ACE сдвинуты на время распространения

солнечного ветра со скоростью  $V_x$  от точки измерения  $X$  до подсолнечной точки магнитопаузы.

Из данных, показанных на рис. 1, следует, что доступная нам информация была получена со спутников

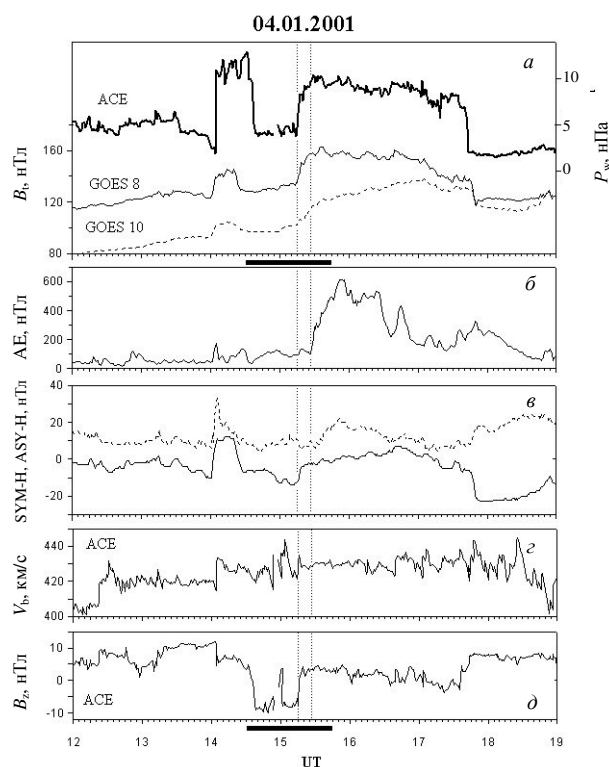


Рис. 1. Вариации: а – динамического давления солнечного ветра, модуля магнитного поля на спутниках GOES-8 и GOES-10 (толстая, тонкая и штриховая линии соответственно); б – АЕ-индекса; в – SYM-H- и ASY-H-индексов (сплошная и штриховая линии); г – скорости солнечного ветра; д –  $B_z$ -компоненты ММП. Здесь и на других рисунках вертикальными точечными линиями отмечены начало роста  $P_{sw}$  и начало суббури. Интервал наличия данных спутников C1, C3, C4 отмечен горизонтальным отрезком.

«Cluster» после резкого уменьшения давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) от 13 нПа до 4.5 нПа. В 14:40–15:14 UT давление солнечного ветра почти стабильно. Первое событие, способное стимулировать усиление альфвеновских колебаний, произошло около 15:15 UT. Это резкое увеличение  $P_{sw}$  от 3.8 нПа в 15:14:36 UT до 8.4 нПа в 15:17:51 UT. По времени оно с точностью до 60 с (шаг дискретизации данных спутников GOES) совпадает с началом внезапного импульса, зарегистрированного спутником GOES-8 в околополуденном секторе как рост модуля магнитного поля от 134.7 нПа в 15:14:30 UT до 150.6 нПа в 15:18:30 UT, и ростом SYM-H-индекса. Следовательно, показанные на рис. 1 а, г зависимости дают правильное представление о времени изменения межпланетной среды на границе магнитосферы.

Второе событие, которое могло усилить поле альфвеновских колебаний, произошло в 15:27:03 UT – через 13 мин после начала роста  $P_{sw}$  и смены знака  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Это взрывное начало суббури. По имеющимся у нас данным, оно проявилось в интенсификации полярных сияний в точке 69.94° N, 123.52° E (23:21 MLT,  $L=3.95$ ) [Freu, et al., 2004], росте  $A_E$ -индекса и цуге Pi2, зарегистрированном среднеширотной обсерваторией Монды (51.6° N, 100.8° E,  $L=2.1$ ). В рассматриваемом временном интервале индекс планетарной магнитной активности  $K_p=3$ .

#### Исходные данные и положение спутников

Для изучения волнового отклика утренней магнитосферы на события SI и SO были использованы трехмерные ряды данных по магнитному полю ( $\mathbf{B}_{GSE}$ ), измеренному спутниками «Cluster», и позиции спутников ( $\mathbf{R}_{GSE}$ ). Исходные данные имеют четырехсекундное временное разрешение и представлены в системе координат GSE. При проведении анализа эти данные были преобразованы к системе координат, ориентированной по сглаженному внешнему магнитному полю. В ней ось  $z$  направлена вдоль вектора магнитного поля, определенного по сглаженным компонентам  $\mathbf{B}_{GSE}$ , ось  $y$  перпендикулярна к векторам  $\mathbf{B}_{GSE}$  и  $\mathbf{R}_{GSE}$  и ориентирована на восток, ось  $x$  перпендикулярна к осям  $z$ ,  $y$  и направлена от центра Земли (см., например, [Kim, et al., 2002]). В магнитосфере вариации  $B_x$ -,  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент магнитного поля соответствуют полоидальной, тороидальной и компрессионной составляющим поля волны, на поверхности Земли в Северном полушарии – северной, восточной и направленной к центру Земли компонентам геомагнитного поля. Сглаженная компонента поля выделялась из исходных рядов низкочастотным ( $T > 1000$  с) фильтром, не меняющим фазу фильтруемого сигнала [Marmet, 1979].

На рис. 2 для интервала наличия магнитных спутниковых данных показаны изменения параметра Мак-Ильвейна ( $L$ ) и геомагнитной широты спутников, рассчитанные в дипольном приближении по углу между векторами  $\mathbf{B}_{GSE}$  и  $\mathbf{R}_{GSE}$  и геоцентрическому расстоянию до спутника [Редерер, 1972]. Эти значения  $L$  совпадают с величинами  $L$ , приведенными на сайте nasa [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public), с точ-

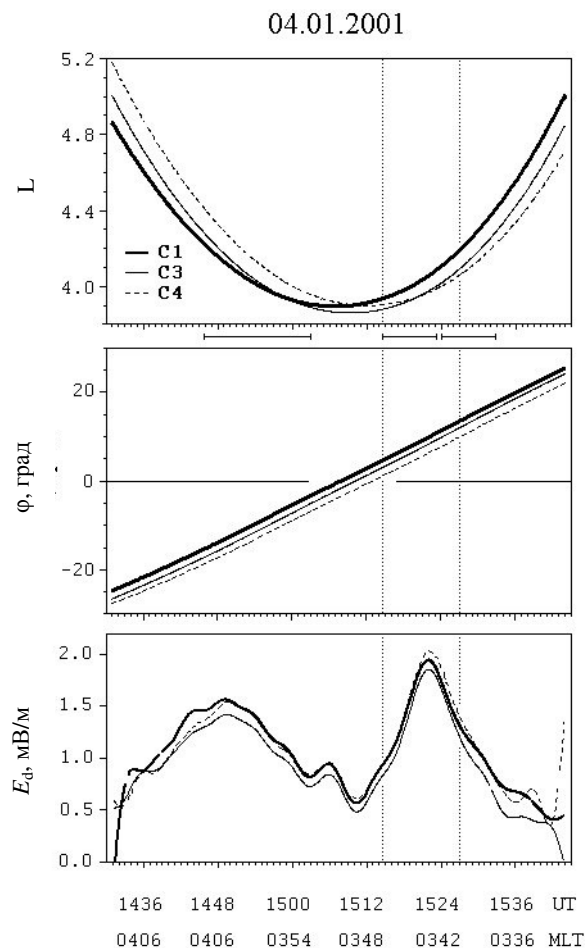


Рис. 2. Изменения параметра Мак-Ильвейна (а), геомагнитной широты спутников (б) и напряженности электрического поля утро–вечер в интервале наличия магнитных данных спутников «Cluster» (в).

ностью до 0.05. Видно, что анализируемые данные получены вблизи перигея спутников. Спутники C1, C3 и C4 пересекли магнитный экватор в 15:07:46 UT на  $L=3.9$ , в 15:10:14 UT на  $L=3.86$  и в 15:12:50 UT на  $L=3.9$  соответственно и находились во время SI и SO в секторе 03:30–04:06 MLT севернее магнитного экватора.

На нижней панели рис. 2 показана длиннопериодная составляющая вариаций напряженности направленного на вечер электрического поля  $E_d$ , измеренного тремя спутниками. Изменения  $E_d$  с периодами  $T \geq 300$  с выделены с помощью фильтра Марме из рядов данных, приведенных в файлах PP\_EFW на сайте nasa [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public). Отчетливо видны два основных максимума, зафиксированных каждым спутником на нисходящем и восходящем участках траектории. Первый максимум  $E_d$  зарегистрирован в Южном магнитном полушарии спутниками C1 в 14:49:06 UT на  $L=4.13$ , C3 в 14:49:26 UT на  $L=4.16$  и C3 в 14:49:50 UT на  $L=4.15$ , второй – в Северном магнитном полушарии спутниками C1, C3 в 15:21:58 UT, C4 – в 15:22:10 UT на  $L$ -оболочках 4.06, 3.98 и 3.97 соответственно.

Судя по небольшим ( $0 \div 24$  с) временным задержкам, спутники «Cluster» наблюдали локальное усиление напряженности крупномасштабного поля конвекции, характерное при  $K_p > 3$  для утренней маг-

нитосферы [Rowland, Wygant, 1998]. Авторы указанной работы полагают, что это результат экранировки электрического поля конвекции, происходящей вблизи внутреннего края кольцевого тока. Однако представляется более вероятным, что крупномасштабная, слабоменяющаяся компонента магнитосферного электрического поля экранируется от внутренней магнитосферы вблизи внутренней кромки плазменного слоя, совпадающей, согласно модельным расчетам, с границей плазмосферы [Нишида, 1980]. Это предположение косвенно подтверждается тем, что за 30 мин максимум  $E_d$  сместился в среднем на  $\Delta L \approx 0.18$  в сторону Земли, что соответствует тенденции смещения экваториальной границы области диффузных высыпаний частиц плазменного слоя к экватору на фазе роста суббури.

### Спектрально-поляризационные характеристики волн

Спектрально-поляризационные характеристики вариаций магнитного поля, зарегистрированных спутниками «Cluster» в плоскости, перпендикулярной к сглаженному магнитному полю, были исследованы путем анализа матрицы спектральной плотности колебаний по методике, подробно описанной в [Rankin, Kurtz, 1970]. Для выборок длительностью  $\Delta T$  по  $N = \Delta T / 4$  с +1 значениям  $B_x$  и  $B_y$  для каждого периода  $T_i = \Delta T / i$  ( $i = 1, (N-1)/2$ ) вычислялись следующие параметры поляризационного эллипса колебаний:  $A_i$  – размер большой полуоси;  $\alpha_i$  – угол между большой осью и осью  $x$ , положительный в 1 и 3 квадрантах и отрицательный во 2 и 4 квадрантах;  $\varepsilon_i$  – эллиптичность, положительная для левополяризованных и отрицательная для правополяризованных колебаний. Кроме этого, для каждого  $T_i$  рассчитывались коэффициент когерентности (КК) и степень поляризации (СП) колебаний.

На рис. 3 показаны построенные по значениям  $A_i$  спектры большой оси поляризационного эллипса колебаний (будем для краткости называть их  $A$ -спектры), зарегистрированных спутниками в трех временных интервалах, отмеченных на рис. 2 горизонтальными отрезками. Это 14:45:54–15:03:14, 15:14:38–15:23:18 и 15:23:58–15:32:38 UT. Второй и третий интервалы длительностью 520 с каждый включают в себя соответственно события SI и SO. Первый, в два раза больший, интервал ( $\Delta T = 1040$  с) выбран нами для сравнения. Он содержит измерения, полученные спутниками «Cluster» в том же диапазоне L-оболочек, в котором были зарегистрированы волновые события, сопровождавшие внезапный импульс и начало суббури, а именно на  $3.88 \leq L \leq 4.4$ .

Сопоставление спектров показывает, что внезапный импульс и внезапное начало суббури сопровождаются усилением колебаний в нескольких полосах периодов, что характерно для геомагнитных пульсаций, относимых к типу Pi2 [Пудовкин и др., 1976]. Рост значений  $A$  наиболее значителен на периодах 104–130 с. В спектрах, построенных по выборкам с  $\Delta T = 520$  с, этот диапазон периодов соответствует значениям  $i = 4, 5$ , а в спектрах с  $\Delta T = 1040$  с – значениям  $i = 8–10$ . В этом же диапазоне периодов находится единственный хорошо различимый на фоне

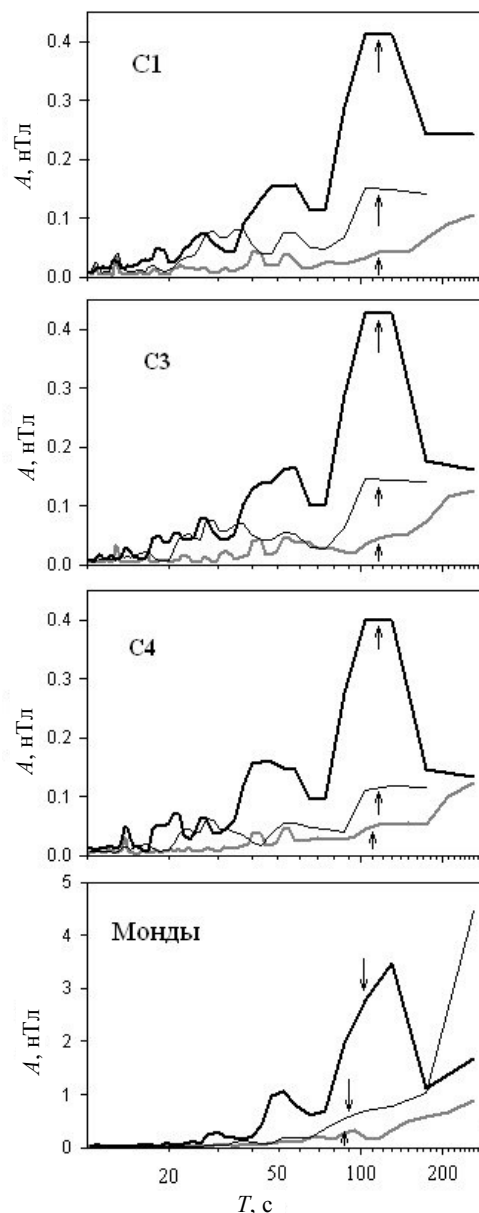


Рис. 3. Спектры колебаний, зарегистрированных тремя спутниками и обсерваторией Монды до событий SI/SO, во время SI и SO (серая, тонкая и толстая черные линии соответственно). Стрелками отмечены максимумы спектров, вычисленных методом максимальной энтропии для  $B_x$ -компоненты магнитного поля.

шумов максимум спектров, вычисленных методом максимальной энтропии по выборкам  $B_x$  и  $B_y$ .

Характеристики колебаний, зарегистрированных перед SI, сопровождавших внезапный импульс SI и начало суббури SO, даны в таблице. Для каждого события и каждого спутника указаны значения, соответствующие максимуму амплитудного спектра, вычисленного по матрице спектральной плотности [Rankin, Kurtz, 1970]. Видно, что до внезапного импульса все спутники регистрировали правополяризованные колебания с  $T = 115.5–130$  с, большая ось поляризационного эллипса которых лежит в 1 и 3 квадрантах. После SI большая ось поляризационного эллипса колебаний увеличилась, а угол ее наклона и эллиптичность уменьшились, но не изменили знаков. Колебания по-прежнему являются правополяризованными ( $\varepsilon < 0$ ) и большая ось поляризационного эллипса

Спутник/интервал	$T$ , с	КК	СП	$A$ , нТл	$\alpha$ , град	$\varepsilon$
C1/перед SI	115.5	1	1	0.04	57	-0.76
C1/SI	104	1	1	0.15	15	-0.49
C1/SO	104/130	0.96	0.96	0.41	-36	0.66
C3/перед SI	130	0.73	0.75	0.05	82	-0.68
C3/SI	104	1	1	0.15	19	-0.40
C3/SO	104/130	0.97	0.97	0.43	-33	0.59
C4/перед SI	115.5	0.85	0.85	0.05	35	-0.57
C4/SI	104/130	1/0.60	1/0.71	0.11/0.12	21/17	-0.34/-0.30
C4/SO	104/130	0.97	0.97	0.40	-28	0.60

находится в 1 и 3 квадрантах ( $\alpha > 0$ ). Период амплитудного максимума колебаний тоже не изменился, так как максимальные различия между значениями  $T$ , приведенными в таблице для первого и второго интервалов, равны шагу дискретизации спектра. В отличие от них, колебания с  $T=104-130$  с, сопровождающие внезапное начало суббури, левополяризованные ( $\varepsilon > 0$ ), а большая ось их эллипса поляризации лежит во 2 и 4 квадрантах ( $\alpha < 0$ ). Размер большой оси поляризации эллипса колебаний почти на порядок больше, чем во временном интервале, предшествующем событиям SI, SO.

Таким образом, значения параметров поляризационного эллипса колебаний показывают, что внезапный импульс и внезапное начало суббури сопровождались усилением колебаний с  $T=115.5-130$  с, существовавших ранее на тех же L-оболочках и зарегистрированных спутниками до событий SI, SO. Сжатие магнитосферы не вызвало радикальных изменений в поляризации колебаний. В отличие от него, внезапное начало суббури сопровождалось сменой направления вращения вектора магнитного поля и изменением ориентации поляризационного эллипса этих возмущений.

Различие в знаке эллиптичности колебаний, показанное для максимума амплитудного спектра УНЧ-волн, сопровождавших события SI и SO, отчетливо видно также в вариациях  $B_x(t)$  и  $B_y(t)$  с периодами 80–150 с, выделенных из исходных данных фильтром Марме. Они показаны на рис. 4. Видно, что амплитуда колебаний увеличивается после внезапного импульса. В интервале 15:16–15:23 UT экстремумы  $B_x$  опережают экстремумы  $B_y$  и волны являются правополяризованными. Около 15:23:30 UT на всех графиках наблюдается отмеченный на рисунке стрелкой сбой фаз, после которого экстремумы  $B_x$  запаздывают относительно экстремумов  $B_y$  и волны становятся левополяризованными.

Отметим еще одну особенность волн, зарегистрированных в области главного максимума амплитудного спектра. На рис. 5, а показаны временные изменения огибающей колебаний ( $A_i = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$ ) с периодами 80–150 с. На верхней панели горизонтальным отрезком отмечен интервал, в котором спутники C1 и C3 находились на близких L-оболочках (C1 на  $L=3.89 \div 3.95$  и C3 на  $L=3.87 \div 3.96$ ) в Южном полушарии. Отметим, что спутник C3 был расположен на  $\sim 1.8^\circ$  дальше от экватора, чем спутник C1 (см. рис. 2) и значения  $A_i$  на этом спутнике были в  $\sim 1.2$  раза больше, чем на C1. Такое же соотношение между величинами

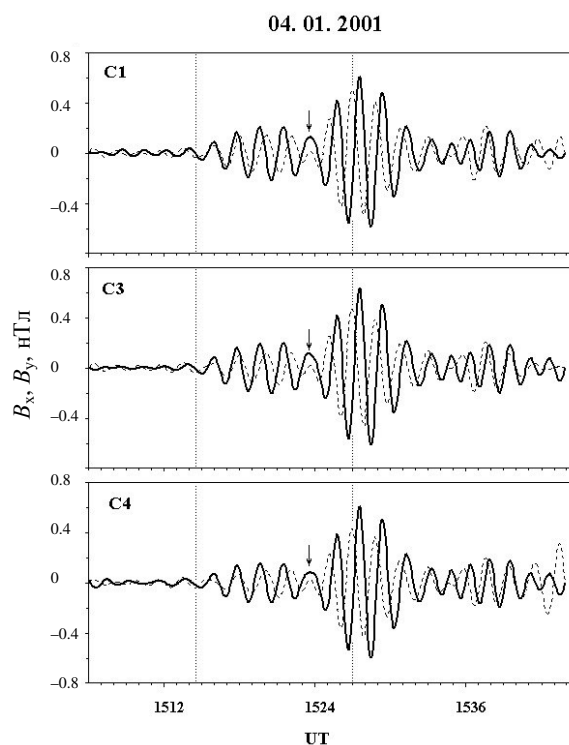


Рис. 4. Вариации поперечных  $B_x$  (сплошная линия) и  $B_y$  (пунктирная линия) составляющих магнитного поля, зарегистрированные тремя спутниками «Cluster» в диапазоне 80–150 с.

огибающих наблюдается в интервале, отмеченном горизонтальным отрезком на нижней панели рис. 5: значения  $A_i$  на спутнике C3 в  $\sim 1.2$  раза больше, чем на спутнике C4. В этом случае спутники C3 и C4 находились в Северном полушарии на  $L=3.92 \div 3.99$  и  $L=3.92 \div 3.98$  соответственно, а магнитная широта C3 была на  $2^\circ$  больше широты C4. Таким образом, на близких L-оболочках амплитуда колебаний увеличивалась с широтой.

### Обсуждение

Анализ временных изменений трех компонент полного сигнала и зависимостей  $B_x(t)$ ,  $B_y(t)$  и  $B_z(t)$ , выделенных из него путем полосовой фильтрации, показывает, что первое усиление колебаний совпадает по времени с указанным выше моментом SI во всем рассматриваемом диапазоне периодов. В отличие от него, временные соотношения между моментом SO и ростом амплитуды колебаний на периодах больших и меньших 40 с различны. Так, например, на рис. 4 отчетливо видно, что отмеченный стрелкой сбой фаз и

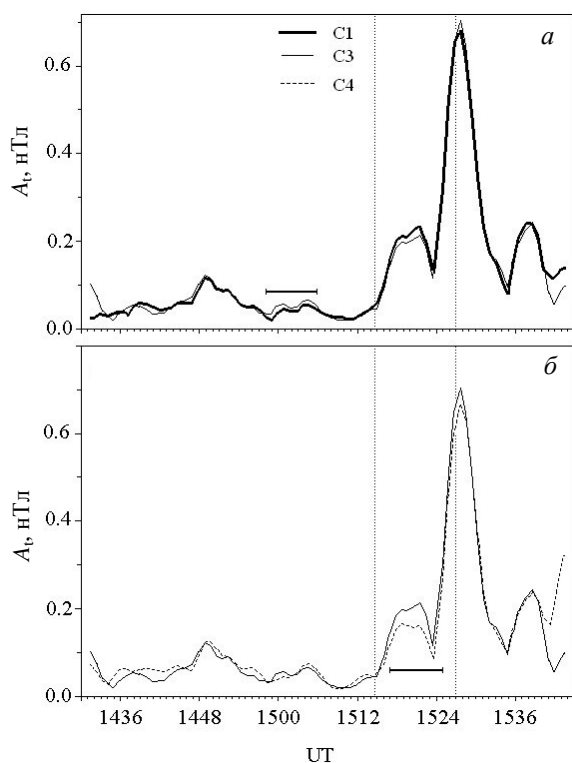


Рис. 5. Вариации огибающей УНЧ-волн, зарегистрированных спутниками для периодов 80–150 с в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю.

начало второго усиления колебаний с периодами 80–150 с зафиксированы тремя спутниками на 3 и 2 мин раньше внезапного начала суббури, определенного в работе [Frey, et al., 2004] по сияниям, но максимум амплитуды колебаний примерно совпадает с ним. Такие же временные соотношения получены для колебаний с периодами 40–70 с. В отличие от этого усиление колебаний с периодами  $T \leq 40$  с совпадает с началом суббури с точностью до минуты.

Возникает вопрос, являются ли сопровождающие событие SO квазипериодические возмущения магнитного поля спектральными составляющими геомагнитных пульсаций, относимых к типу Pi2, которые, как принято считать, являются надежным индикатором начала суббури? Для ответа на этот вопрос рассмотрим спектры геомагнитных пульсаций, зарегистрированных в предполуночном секторе (22:00–23:00 MLT) среднеширотной обсерваторией Монды. Они построены по данным индукционного магнитометра с учетом чувствительности и показаны на нижней панели рис. 3. Видно, что спектры колебаний, наблюдавшихся на Земле и в космосе на периодах 25–170 с во временном интервале, включающем начало суббури, подобны. Судя по показанным на рис. 6 изменениям огибающей, вычисленной по горизонтальным компонентам наземного сигнала и вариациям амплитуды колебаний в полосе периодов 80–150 с, усиление колебаний с  $T > 40$  с зафиксировано наземной обсерваторией, так же как и спутниками, на 2–3 мин раньше, чем указанное в [Frey, et al., 2004] начало суббури.

В момент SO обсерватория Монды находилась всего лишь на  $23^\circ$  западнее меридиана зарождения суббури, т. е. в долготном секторе, где, как принято

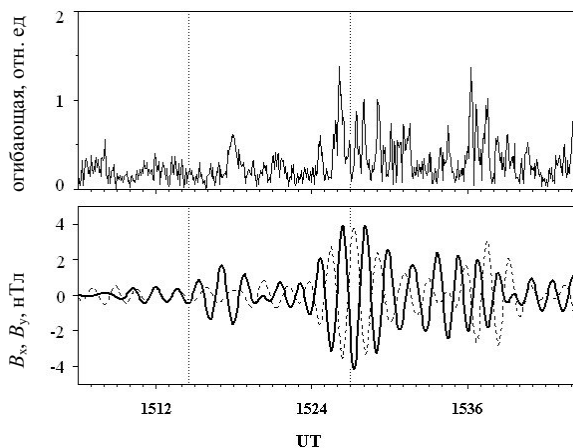


Рис. 6. Построенные по данным обсерватории Монды вариации огибающей сигнала в горизонтальной плоскости (вверху) и амплитуды колебаний в полосе периодов 80–150 с (внизу).

считать, начало цуга Pi2 надежно определяет начало взрывной фазы суббури (см., например, [Yuemori, Rao, 1996]). Следовательно, всплеск колебаний, зарегистрированный на Земле в 15:24–15:32 UT, может быть определен как цуг Pi2, а УНЧ-волны, зарегистрированные на периодах 104–130 с в космосе, – как спектральная составляющая этого цуга, являющаяся резонансными альфвеновскими колебаниями. Что же касается таймирования начала суббури по цугу Pi2, то оно, по-видимому, должно проводиться только по высокочастотной части всплеска, а именно по колебаниям с  $T < 40$  с. Этот же вывод следует из данных работы [Erickson, et al., 2000], в которой показано, что зарождающиеся в плазменном слое хвоста магнитосферы триггерные колебания в диапазоне 60–90 с часто предшествуют взрывной фазе суббури, что фактически делает невозможным надежное таймирование суббурового взрыва по началу длиннопериодной составляющей цуга Pi2.

### Заключение

Анализ спектрально-поляризационных характеристик УНЧ-волн, зарегистрированных 4 января 2001 г. в утренней магнитосфере на L~4 спутниками «Cluster» во время внезапного импульса (SI) и последовавшего за ним через 13 мин начала суббури (SO), показывает следующее:

1. Указанные импульсные процессы стимулировали усиление УНЧ-волн в нескольких частотных диапазонах. При этом спектральный состав колебаний, сопровождавших события SI и SO, был идентичным.

2. Амплитуда наиболее мощной спектральной составляющей широкополосного сигнала увеличивалась с ростом геомагнитной широты, а ее поляризация изменилась между событиями SI и SO на противоположную.

3. На среднеширотной наземной станции эта спектральная составляющая была зарегистрирована как один из спектральных максимумов цуга Pi2.

В рамках известных моделей генерации альфвеновских колебаний полученные результаты могут быть объяснены следующим образом. Внешние (SI) и внутренние (SO) импульсные источники

усиливают нечетную моду альфвеновских колебаний одной и той же резонансной оболочки, при этом поляризация волн определяется положением источника. Во время внезапного импульса источник поверхностных волн, активизирующих альфвеновские колебания, расположен на дневной магнитопаузе и в утренний сектор проникают поверхностные МГД-волны, распространяющиеся на запад. Во время начала суббури импульсный источник возмущения находится в хвосте магнитосферы и альфвеновские колебания усиливаются МГД-волнами, распространяющимися в восточном направлении [Kepko, Kivelson, 1999]. Смена направления распространения первичных волн сжатия, вызванная появлением суббурного источника, приводит к изменению направления вращения вектора возмущения магнитного поля и ориентации поляризационного эллипса альфвеновских волн, зарегистрированных, судя по поляризации, вне резонирующей магнитной оболочки.

Автор выражает благодарность сотрудникам ИСЗФ, обеспечивающим работу обсерватории Монды, руководителям проектов «Cluster», GOES и ACE за предоставление доступа к их данным на сайте <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp-public>, а также профессору К.-Х. Глассмейеру (К.-Н. Glassmeier) за координатные и магнитные данные спутников «Cluster». Работа была поддержана грантом РФФИ 07-05-00185-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Золотухина Н.А. Резонансные свойства Psi5/Psc5 на геостационарной орбите // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 4. С. 460–471.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. 1980. М.: Мир, 299 с.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть 2: Короткопериодические колебания геомагнитного поля. 1976. Л.: Изд-во ЛГУ, 270 с.
- Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. 1972. М.: Мир, 189 с.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т. 97, вып. 3. С. 453–494.
- Allan W., Wright A.N., McDiarmid D.R. Spacecraft transits across simulated field line resonance regions // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N 7. P. 14407–14414.
- Erickson G.M., Maynard N.C., Burke W.J., et al. Electromagnetics of substorm onsets in the near-geosynchronous plasma sheet // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A11. P. 25265–25290.
- Frey H.U., Mende S.B., Angelopoulos V., Donovan E.F. Substorm onset observations by IMAGE-FUV // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, N 10. P. A304. doi:10.1029/2004JA010607.
- Iyemori T., Rao D.R.K. Decay of the Dst field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation // Ann. Geophysicae. 1996. V. 14, N 11. P. 608–618.
- Kepko L., Kivelson M. Generation of Pi2 pulsations by bursty bulk flows // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N 11. P. 25021–25034.
- Kim K.-H., Cattell C. A., Lee D.-H., et al. Magnetospheric responses to sudden and quasiperiodic solar wind variations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A11. P. 1406, doi:10.1029/2002JA009342.
- Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data // Rev. Sci. Instrum. 1979. V. 50, N 1. P. 79–83.
- Olson J.V. Pi2 pulsations and substorm onsets: A review // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N 8. P. 17499–17520.
- Rankin D., Kurtz R. Statistical study of micropulsation polarizations // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 28. P. 5444–5458.
- Rowland D.E., Wygant J.R. Dependence of the large-scale, inner magnetospheric electric field on geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N 7. P. 14959–14964.
- Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // Planet. Space Sci. 1974. V. 22, N 3. P. 483–491.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск