

УДК 533.951

А. В. Агапитов¹, О. К. Черемных²

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
03022 Киев, пр. Академика Глушкова 2
agapit@univ.kiev.ua

²Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины
03022 Киев, пр. Академика Глушкова 40, к. 4/1

Поляризация резонансных УНЧ-возмущений в магнитосфере Земли

Сформулированы условия реализации резонансных возмущений УНЧ-диапазона с различной поляризацией, которые проверены с использованием наблюдательных данных с различных космических аппаратов. Наблюдаемые возмущения удовлетворительно согласуются со сформулированными условиями.

ПОЛЯРИЗАЦІЯ РЕЗОНАНСНИХ УНЧ-ЗБУРЕНЬ У МАГНІТОСФЕРІ ЗЕМЛІ, Агапітов О. В., Черемних О. К. — Сформульовано умови реалізації резонансних збурень УНЧ-діапазону з різною поляризацією та проведено їхню верифікацію на основі спостережних даних з космічних апаратів. Спостережувані збурення відповідають сформульованим умовам.

POLARIZATION OF ULF WAVES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE, by Agapitov O. V., Cheremnykh O. K. — The conditions for the realization of ULF waves with different polarization are formulated and verified with the use of observational data from the spacecrafts which performed measurements in the Earth's magnetosphere. It is shown that the condition formulated are in good agreement with observed wave parameters.

ВВЕДЕНИЕ

В геомагнитной системе периодические возмущения магнитного поля наблюдаются с 1864 г. В магнитосопряженных областях на поверхности Земли и в околоземном космическом пространстве эти возму-

щения скоррелированы, что свидетельствует о глобальном, в масштабе магнитосферы, характере процесса и его локализации вдоль выделенной силовой линии. В терминах собственных возмущений плазмы обычно описывают низкочастотные геомагнитные пульсации. Ультранизкочастотные (УНЧ) периодические возмущения геомагнитного поля с периодом от 1 до 600 с являются одним из основных каналов транспорта энергии из солнечного ветра в магнитосферу Земли. Природа этих возмущений, по современным представлениям, связана с резонансной раскачкой стоячих МГД-волн на силовых линиях магнитного поля. Такое объяснение было предложено в работах [14, 29] и позднее было использовано в работах [27] и [8] для объяснения результатов наблюдений возмущений магнитного поля, приведенных в работе [25]. Генерация МГД-волн в космическом пространстве во многом обусловлена неоднородностью структуры магнитосферы, на границах которой обычно наблюдается возмущение геомагнитного поля. В начале 1960-х гг. в рамках простейшей модели неоднородной магнитосферы с прямыми силовыми линиями магнитного поля, ограниченными двумя идеально проводящими ионосферами [28], было проанализировано распространение быстрой магнитозвуковой (БМЗ) волны поперек магнитного поля. Выяснилось, что уравнение для волны содержит сингулярность [28], которая возникает при совпадении периода БМЗ-волны с периодом собственной альвеновской моды, распространяющейся вдоль силовой линии [28]. Именно это сингулярное резонансное взаимодействие отвечает за генерацию альвеновской волны на силовой линии. Этот эффект получил в дальнейшем название резонанса на силовых линиях магнитного поля.

Магнитосферные альвеновские резонансы силовых линий магнитного поля с мультигармоническими частотами достоверно наблюдались на космическом аппарате AMPTE/CSE [29] на расстояниях от двух до девяти радиусов Земли. Было установлено, что они генерируются в диапазоне частот Pc3-Pc5 на дневной стороне магнитосферы от плазмопаузы до магнитопаузы [16, 18]. Позднее для резонансных альвеновских частот была найдена формула масштабирования [7]. Возмущения УНЧ-диапазона в зависимости от поляризации можно разделить на два типа: тороидальные и полоидальные. Убедительное подтверждение резонансной природы тороидальных периодических возмущений УНЧ-диапазона приведено в работе [16], где была получена зависимость частот периодических возмущений от параметра Мак-Илвайна, хорошо объясняемая на основе изложенных выше представлений о резонансе на силовых линиях магнитного поля. В качестве механизма генерации собственных резонансных мод в ряде работ рассматриваются неустойчивость Кельвина — Гельмгольца на магнитопаузе [5, 23, 24], которая реализуется при совпадении частоты поверхностной волны с собственной частотой, внезапные импульсы в динамическом давлении солнечного ветра [1, 6, 11, 23, 28], квазипериодические возмущения параметров солнечного ветра [17], волноводные моды между магнитопаузой и поверхностью отражения волн в

окрестности плазмопаузы [19—22, 25]. В частности, в работе [6] на основе экспериментальных наблюдений показана возможность генерации как полоидальных, так и тороидальных резонансных возмущений на разных частотах в зависимости от магнитной оболочки после широкополосного возмущения магнитного поля, вызванного внезапным импульсом давления солнечного ветра.

Таким образом, теория локальных магнитосферных резонансов на магнитных силовых линиях со стоячими альвеновскими волнами, появляющимися в виде отклика на распространение внешних возмущений на границе магнитосферы, способна объяснить основные особенности геомагнитных возмущений диапазона Pc3–Pc5.

В данной работе на основе наблюдательных данных и теоретических моделей анализируется поляризация собственных УНЧ-пульсаций в магнитосфере. Эффект резонанса на силовых линиях магнитного поля в настоящее время далеко выходит за рамки геофизики. Теории, использующие этот эффект, разрабатываются в физике Солнца [14], комет [11] и в разработке методов ВЧ-нагрева плазмы [9].

ПОЛЯРИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ УНЧ-ДИАПАЗОНА

Для объяснения общих свойств МГД-пульсаций в магнитосфере Земли достаточно использовать упрощенные модели магнитного поля. Однако для изучения тонкой структуры магнитосферных резонансов необходимо обратиться к геометрии магнитного поля, распределению плотности плазмы и профилям токов, близких к реальным. Теоретические модели магнитосферных резонансов, ввиду математической сложности их описания, в течение длительного времени были ограничены приближением «холодной» плазмы и простейшими геометриями магнитного поля. Только по прошествии достаточно длительного времени в работах [4, 10, 12] магнитосферные резонансы были рассмотрены в достаточно реалистичном приближении. Результаты этих работ для дальнейшего анализа удобно интерпретировать в дипольной геометрии магнитного поля, поскольку в этом случае уравнения для резонансов имеют достаточно простой вид.

В сферической системе координат r , дипольное магнитное поле \vec{B} имеет вид

$$\vec{B} = [B_r \hat{r} + B_\theta \hat{\theta}], \quad (1)$$

а вектор смещения \vec{r} элементарного объема плазмы можно представить в виде

$$\vec{r} = \frac{1}{|\vec{r}|^2} \left[\frac{\vec{B}}{|\vec{B}|^2} \right] \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|^2}. \quad (2)$$

Здесь $\vec{B} \cdot \vec{r}$ — полоидальный магнитный поток.

В работе [1] было показано, что в указанной геометрии имеют место два типа резонансных возмущений: тороидальные альвеновские

моды (ТАМ), которые описываются уравнением

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{|\vec{B}|^2}{|\vec{r}|^2} \vec{B} - \frac{|\vec{r}|^2}{|\vec{B}|^2} \vec{B} = 0, \quad (3)$$

и не связанные с ними медленные магнитозвуковые (ММЗ) моды, которые описываются уравнением

$$\vec{B} - \frac{P}{2|\vec{B}|^2} \vec{B} - \text{div} \vec{r} (1 - \beta) \text{div} \vec{r} = 0. \quad (4)$$

Здесь β — показатель адиабаты, β — плазменный параметр, отношение давления плазмы к давлению магнитного поля $B^2/(8\pi n k_B T)$, n — плотность плазмы. Уравнения (3) и (4) с соответствующими граничными условиями описывают свободные (собственные) колебания. Магнитосферная плазменная система, выведенная из положения равновесия внешним возмущением, будет совершать собственные колебания на частотах, являющихся собственными значениями уравнений (3) и (4). В качестве внешнего возмущения могут выступать, например, возмущения в солнечном ветре, распространяющиеся от магнитопаузы в виде БМЗ-волны. В работе [3] для дипольной геометрии магнитного поля применимость уравнений (3) и (4) была уточнена для собственных поперечно-мелкомасштабных возмущений. Было показано, что ТАМ и ММЗ реализуются в случае $\vec{r} \cdot \vec{B} = 0$, т. е. когда вектор смещения (2) лежит на магнитной поверхности $\vec{r} \cdot \vec{B} = \text{const}$, поскольку, как следует из (2), в этом случае справедливо равенство $\text{div} \vec{r} = 0$.

В работах [3, 4] для произвольной геометрии магнитного поля с магнитными поверхностями было показано, что помимо резонансной раскачки собственных волн, описываемых уравнениями (3) и (4), раскачиваются также магнитосферные волны другого типа. Эти резонансные возмущения даже в дипольной геометрии магнитного поля «зацеплены» друг с другом через радиальную кривизну силовых линий магнитного поля и описываются уравнениями

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{|\vec{B}|^2}{|\vec{r}|^2} \vec{B} - \frac{1}{|\vec{r}|^2} \vec{B} - \frac{2\vec{r} \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^2} (p - \text{div} \vec{r}), \quad (5)$$

$$\vec{B} - \frac{P}{2|\vec{B}|^2} \vec{B} - \text{div} \vec{r} (1 - \beta) \text{div} \vec{r} - \frac{2\vec{r} \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^2} \vec{r} = 0, \quad (6)$$

где \vec{r} — вектор кривизны силовой линии магнитного поля. Уравнение (5) описывает резонансные полоидальные альвеновские моды, а уравнение (6) — ММЗ-моды. Видно, что в дипольной геометрии полоидальные и тороидальные моды генерируются независимо друг от друга.

В работе [3] было продемонстрировано, что уравнения (5) и (6) для поперечно-мелкомасштабных возмущений в дипольной геометрии

магнитного поля реализуются при $\alpha = 0$. Последнее обстоятельство означает, что в этом случае вектор смещения $\vec{\xi}$ лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитной поверхности, поскольку вектор смещения (2) удовлетворяет равенству $[\vec{B}, \vec{\xi}] = 0$.

Изложенные выше результаты допускают следующую достаточно простую интерпретацию механизма генерации УНЧ-возмущений. Указанные возмущения генерируются при условии, что вектор возмущающей силы (или смещения) направлен определенным образом по отношению к магнитным поверхностям. Если возмущающая сила действует на элементарный плазменный объем вдоль магнитной поверхности, то в этом случае генерируются тороидальные альвеновские и ионно-звуковые моды. Такая ситуация реализуется в магнитосфере в утреннем и вечернем секторах. Если же возмущающая сила лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитной поверхности, то силовые линии магнитного поля находятся в резонансе с полоидальными альвеновскими и ионно-звуковыми модами. Из геометрии взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой следует, что последние должны генерироваться в дневном секторе магнитосферы под действием возмущений в солнечном ветре. В областях между дневной частью магнитосферы и «утренним» и «вечерним» секторами могут генерироваться как собственные ТАМ, ПАМ, так и ММЗ.

Для того чтобы отличить в данных измерений медленные магнитозвуковые волны от быстрых магнитозвуковых, рассмотрим поведение кинетического давления плазмы и давления магнитного поля в рамках одножидкостной МГД. Рассмотрим возмущение в виде плоской волны, т. е. $\exp[-i(\omega t - k_x x - k_{\parallel} z)]$, и запишем выражение для возмущения кинетического давления плазмы к возмущенному магнитному давлению $\vec{B} \cdot \vec{B}$ в виде

$$\frac{P}{\vec{B} \cdot \vec{B}} = [1 - V_s^2 \cos^2 \theta / V_{ph}^2]^{-1}, \quad V_{ph} = \frac{c}{k}. \quad (9)$$

Остановимся на значении выражения (9) для БМЗ- и ММЗ-волн магнитосфере Земли. В магнитосфере Земли, в которой $\beta \ll 1$ для БМЗ-волны выражение (9) всегда положительно, его значение пропорционально плазменному параметру $\beta = p / (\vec{B} \cdot \vec{B})$ с коэффициентом пропорциональности, близким к единице:

$$\frac{P}{\vec{B} \cdot \vec{B}} \approx \beta. \quad (10)$$

Для ММЗ-волны выражение (9) при рассматриваемых давлениях всегда отрицательно:

$$\frac{P}{\vec{B} \cdot \vec{B}} \approx -1 - \frac{k_{\parallel}^2}{k^2}. \quad (11)$$

Для поперечно-мелкомасштабных возмущений ($k \gg k_{\parallel}$) выражение в правой части стремится к значению -1 . Из (11) следует, что наблю-

дательным признаком генерации ММЗ волны является противофазное поведение p и \vec{B} . В этом случае возмущенное полное давление плазмы обращается в ноль:

$$P - p - \vec{B} \vec{B} = 0. \quad (12)$$

При выполнении условий (12) БМЗ-волна отсутствует. Если суммарное возмущение давления больше возмущения давления магнитного поля, то в плазменной среде есть БМЗ-волна. Поскольку альвеновские волны и ММЗ-волны распространяются вдоль силовых линий магнитного поля, то из-за ограниченности силовых линий проводящей ионосферой они реализуются как собственные стоячие волны. Что касается БМЗ-волны, то в открытых магнитных системах, к которым принадлежит магнитосфера, она не может быть собственной волной и поэтому генерируется внешними возмущениями. Из результатов работ [4, 9] следует, что именно при $P = 0$ в плазме с магнитными поверхностями генерируются резонансы. В работе [3] было показано, что при $P = 0$ в плазменной системе генерируются собственные поперечно-мелкомасштабные МГД-моды. Таким образом, БМЗ-волна, генерируемая в магнитосфере внешними источниками, является естественным источником раскачки собственных поперечно-мелкомасштабных мод. В магнитосфере Земли обычно наблюдается частичная компенсация давления магнитного поля кинетическим давлением плазмы. Причиной этого эффекта является то, что волновой процесс в магнитосфере контролируется изменениями магнитного поля, а не возмущенным давлением плазмы.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ УНЧ-РЕЗОНАНСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Рассмотрим результаты анализа поляризации собственных колебаний УНЧ-диапазона в магнитосфере Земли. На рис. 1 показана динамика изменений магнитного поля при возмущениях тороидального и полоидального типов. На рис. 1, а показаны три компоненты магнитного поля по измерениям на борту космического аппарата АМРТЕ/ССЕ 7 февраля 1985 г. Измерения приведены в системе координат, связанной с локальным вектором магнитного поля и меридиональной плоскостью (см. рис. 2). Хорошо видны низкочастотные периодические азимутальные возмущения магнитного поля. На рис. 1, б приведены три составляющие магнитного поля в системе координат локального магнитного поля по измерениям на борту космического аппарата «Equator-S» 18 марта 1998 г. На нижней диаграмме показано давление магнитного поля (серая линия) и динамическое давление плазмы (черной линией показаны значения динамического давления, умноженные на 100). Видно, что возмущается в основном радиальная составляющая магнитного поля (x -составляющая в локальной магнитной системе координат), т. е. наблюдается полоидальная волна. Под

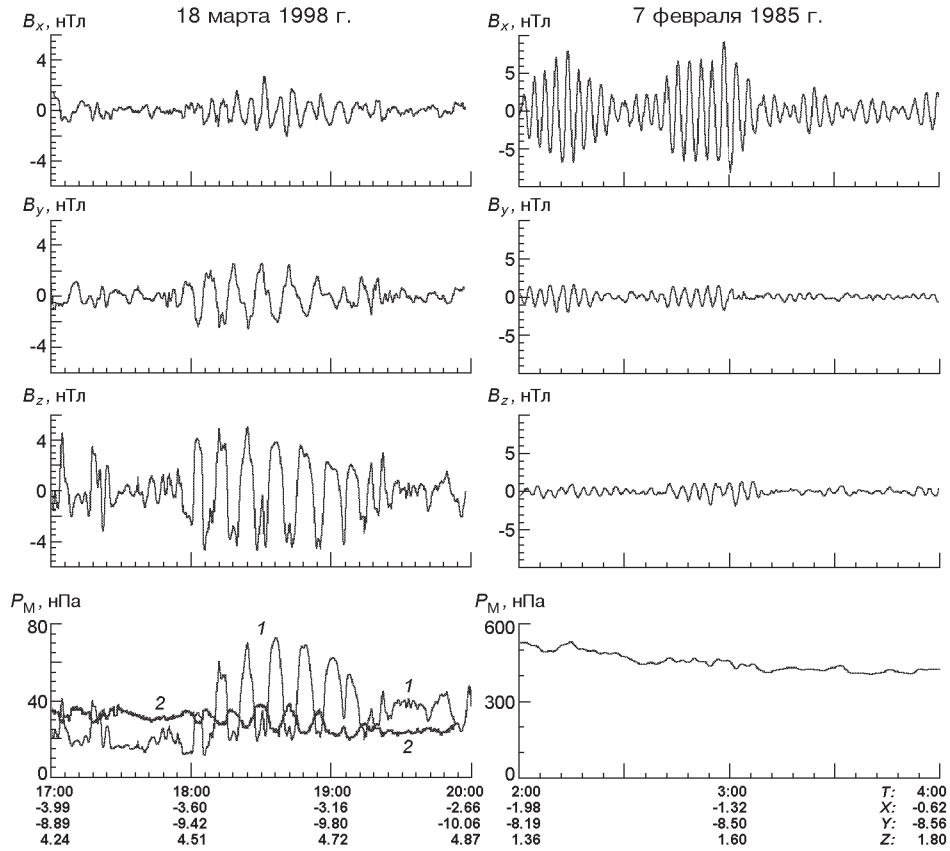
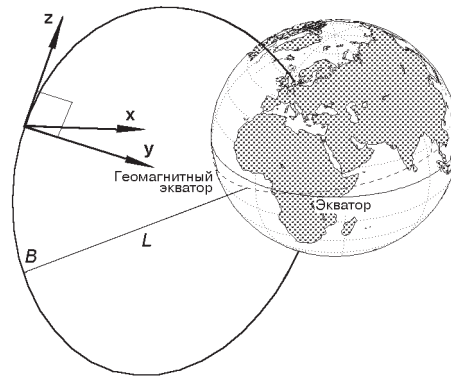


Рис. 1. Составляющие магнитного поля в системе координат локального магнитного поля 18 марта 1998 г. Давление магнитного поля и динамическое давление плазмы (показано значение динамического давления, умноженные на 100). Внизу приведены координаты космического аппарата «Equator-S» в системе координат GSE

Рис. 2. Система координат, связанная с локальным направлением магнитного поля. Ось Z выбирается вдоль локального вектора магнитного поля (либо по измерениям, либо модельного), ось X перпендикулярна к магнитной меридиональной плоскости (плоскости дипольной силовой линии) и направлена на восток, ось Y лежит в меридиональной плоскости и дополняет систему до правой системы координат



временной шкалой приведены координаты космического аппарата «Equator-S» в системе координат GSE. Отметим, что возмущение кинетического давления плазмы в волновом событии происходит в противофазе с возмущением давления магнитного поля, что, как отмечалось выше, характерно для возмущений ММЗ-типа.

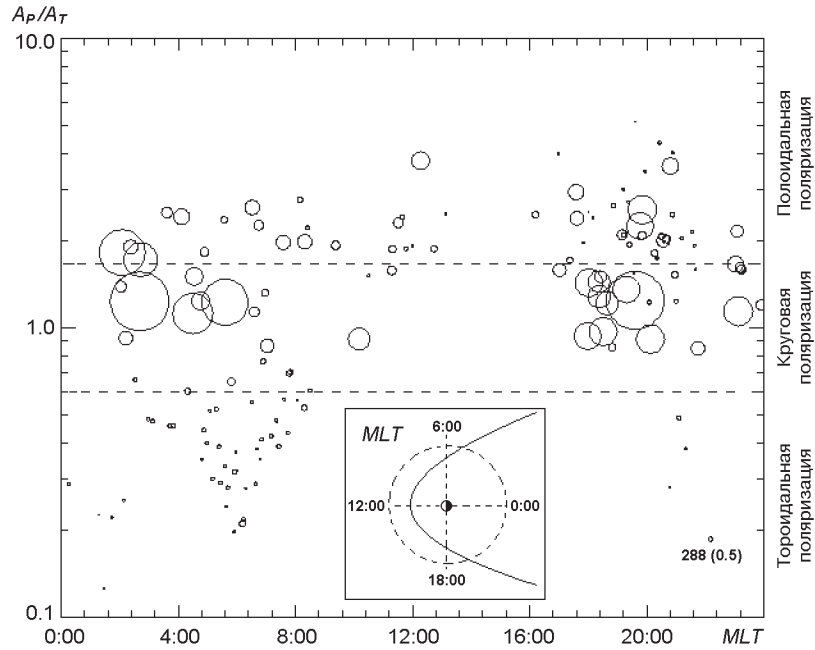


Рис. 3. Распределение УНЧ-событий, зарегистрированных на борту AMPTE/CSE в 1986 г., в зависимости от магнитного локального времени наблюдения и поляризации магнитного поля в волне. Параметр поляризации приведен в виде отношения амплитуды полоидальной составляющей к амплитуде тороидальной. Размер точки показывает отношение продольной составляющей возмущения магнитного поля к поперечной. Магнитное локальное время приведено внизу

Далее рассмотрим статистические закономерности параметров собственных мод геомагнитных возмущений в зависимости от их поляризации. Распределение наблюдаемых УНЧ-событий в зависимости от магнитного локального времени наблюдения (MLT) и поляризации магнитного поля в волне показано на рис. 3. Диаметр кружка на диаграмме пропорционален отношению продольной составляющей возмущения магнитного поля (относительно локального магнитного поля) к поперечной составляющей.

Таким образом, чем больше диаметр кружка, тем больше возмущение магнитного давления в волне, и поэтому такую волну можно идентифицировать как ММЗ. В качестве параметра, характеризующего поляризацию волны, выбрано отношение амплитуды полоидальной составляющей к амплитуде тороидальной. С таким определенным параметром поляризации тороидальные волны группируются в нижней части диаграммы, а полоидальные — в верхней.

Как видно из диаграммы, тороидальные волны генерируются без возмущения давления магнитного поля и, соответственно, без возмущения давления плазмы. Наиболее часто они регистрируются на флангах магнитосферы Земли. При этом отношение амплитуды продольной составляющей возмущения магнитного поля к поперечной не превышает 0.5. Для большинства событий с тороидальными возмуще-

ниями магнитного поля это отношение составляет менее 0.1. Наблюдаемая на рис. 3 асимметрия утреннего и вечернего секторов магнитосферы может быть объяснена в рамках механизма генерации неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца на флангах магнитосферы или волноводной модой.

Для полоидальных волн характерно наличие существенной составляющей давления магнитного поля и динамического давления плазмы. Отношение амплитуд продольного и поперечного возмущения магнитного поля в волне могут достигать 4. В среднем это отношение в полоидальных волнах составляет 1.5—2.5.

Максимальные амплитуды продольной составляющей возмущения магнитного поля в волне наблюдаются в волновых событиях с поляризацией, близкой к круговой. Отношение продольной и поперечной амплитуд возмущения может достигать 5—7. Волновые события с линейной поляризацией и с близкими по амплитуде тороидальной и полоидальной составляющими проходят с меньшим возмущением давления магнитного поля.

ВЫВОДЫ

Сформулируем полученные результаты.

1. Резонансные поперечно-мелкомасштабные возмущения генерируются при условии, что вектор возмущающей силы (или смещения) направлен определенным образом по отношению к магнитным поверхностям. В указанной геометрии имеют место два типа резонансных возмущений: тороидальные альвеновские моды и несвязанные с ними медленные магнитозвуковые моды. Эти резонансные возмущения в дипольной геометрии магнитного поля «зацеплены» друг с другом через радиальную кривизну силовых линий магнитного поля. В дипольной геометрии полоидальные и тороидальные моды генерируются независимо друг от друга в зависимости от направления внешнего возмущения магнитного поля. Если возмущающая сила (и вектор смещения) действуют на элементарный плазменный объем вдоль магнитной поверхности, то в этом случае генерируются тороидальные альвеновские и ионно-звуковые моды. Такая ситуация реализуется в магнитосфере в утреннем и вечернем секторах. Если же возмущающая сила лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитной поверхности, то силовые линии магнитного поля находятся в резонансе с полоидальными альвеновскими и ионно-звуковыми модами.

2. Показано, что в однородном магнитном поле противофазное поведение давления плазмы и давления магнитного поля является характерным признаком волнового процесса магнитозвукового типа, а синфазное — возмущения быстрого магнитозвукового типа. Это свойство магнитного звука использовано для идентификации волновых мод в измерениях магнитного поля и параметров плазмы на борту космических аппаратов.

На основе массива измерений параметров плазмы и магнитного поля космических аппаратов «Equator-S» и АМРТЕ/ССЕ показано, что собственные волновые процессы тороидального типа проходят без возмущения давления магнитного поля и, соответственно, без возмущения давления плазмы. Они наиболее часто регистрируются на флангах магнитосферы Земли. При этом отношение амплитуды продольной составляющей возмущения магнитного поля к поперечной не превышает 0.5. Для большинства событий с тороидальными возмущениями магнитного поля это отношение составляет менее 0.1. Наблюдаемая на рис. 2 асимметрия утреннего и вечернего секторов магнитосферы может быть объяснена в рамках механизма генерации неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца на флангах магнитосферы или волноводной модой. Для полоидальных волн характерно наличие существенной составляющей давления магнитного поля и динамического давления плазмы. Отношение амплитуд продольного и поперечного возмущения магнитного поля в волне могут достигать 4. В среднем это отношение в полоидальных волнах составляет 1.5—2.5. Полоидальные возмущения регистрируются во всех секторах магнитосферы. Это связано с эффективностью их генерации возмущениями, проникающими от магнитопаузы в магнитосферу во всех секторах.

1. *Агапитов А. В., Черемных О. К.* Генерация солнечным ветром собственных УНЧ-мод магнитосферы Земли // *Космічна наука і технологія*.—2008.—**14**, № 4.—С. 72—81.
2. *Агапитов О. В., Верховлядова О. П., Івченко В. М.* Хвилі стиснення в магнітосфері Землі: інтерпретація спостережень супутника «Інтербол-І» // *Космічна наука і технологія*.—2001.—**7**, № 5/6.—С. 64—70.
3. *Черемных О. К., Данилова В. В.* Поперечно-мелкомасштабные МГД-возмущения в космической плазме с магнитными поверхностями // *Кинематика и физика небес. тел.*—2011.—**27**, № 2.—С. 63—79.
4. *Черемных О. К.* К вопросу о резонансных МГД-возмущениях в магнитосферной плазме // *Космічна наука і технологія*.—2010.—**16**, № 1.—С. 61—67.
5. *Agapitov O. V., Glassmeier K.-H., Plaschke F., et al.* Surface waves and field line resonances // *J. Geophys. Res.*—2009.—**114**.—doi:10.1029/2008JA013553.
6. *Agapitov O., Cheremnykh O.* Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses // *Ukr. Phys. J.*—2008.—**53**.—P. 506—510.
7. *Anderson B. J.* Statistical studies of Pc 3—5 pulsations and their relevance for possible source mechanisms of ULF waves // *Ann. geophys.*—1993.—**11**.—P. 128.
8. *Chen L., Hasegawa A.* A theory of long-period magnetic pulsations. 1. Steady state excitation of field line resonance // *J. Geophys. Res.*—1974.—**79**.—P. 1024—1032.
9. *Hasegawa A., Chen L.* Plasma heating by Alfvén-wave phase mixing // *Phys. Fluids.*—1974.—**17**.—P. 1399.
10. *Hollweg J. V.* Resonance absorption of propagating fast waves in a cold plasma // *Planet. Space. Sci.*—1990.—**38**.—P. 1017—1030.
11. *Cheremnykh O. K., Parnowski A., Agapitov O.* Perturbations and collective motions of plasma in the inner magnetosphere of the Earth // *Space Research of Ukraine 2006—2008.* National Space Agency of Ukraine, 2008.—P. 15—18.

12. *Cummings W. D., O'Sullivan R. J., Coleman P. J.* Standing Alfvén waves in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.*—1969.—**74**.—P. 778.
13. *Duffy P.* The acceleration of cometary ions by Alfvén waves' // *J. Plasma Phys.*—1989.—**42**.—P. 13—25.
14. *Dungey J. M.* Electrodynamics of the outer magnetosphere. — University Park, Pa. State Ionos. Res. Lab., 1954.—Sci. Rep. 69.
15. *Engebretson M. J., Zanetti L. J., Potemra T. A., Acuna M. H.* Harmonically structured ULF pulsations observed by the AMPTE CCE magnetic field experiment // *Geophys. Res. Lett.*—1986.—N 13.—P. 905—908.
16. *Kepko L., Spence H. E.* Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // *J. Geophys. Res.*—2003.—**108**.—P. 1257.
17. *Klimushkin D., Mager P., Glassmeier K.* Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wavenumbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere // *Ann. geophys.*—2004.—**22**.—P. 267—287.
18. *Mann I. R., Wright A. N., Mills K. J., Nakariakov V. M.* Excitation of magnetospheric waveguide modes by magnetosheath flows // *J. Geophys. Res.*—1999.—**104**.—P. 333.
19. *Mathie R. A., Mann I. R., Menk F. W.* Pc5 ULF pulsations associated with waveguide modes observed with the IMAGE magnetometer array // *J. Geophys. Res.*—1999.—**104**.—P. 7025—7036.
20. *Mathie R. A., Menk F. W., Mann I. R., Orr D.* Discrete field line resonances and the Alfvén continuum in the outer magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.*—1999.—**26**.—P. 659—662.
21. *Mills K. J., Wright A. N., Mann I. R.* Kelvin-Helmholtz driven modes of the magnetosphere // *Phys. Plasmas*.—1999.—**6**.—P. 4070.
22. *Nishida A.* Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. — New York: Springer-Verlag, 1978.—256 p.
23. *Rae I. J., Donovan E. F., Mann I. R., et al.* Evolution and characteristics of global Pc5 ULF waves during a high solar wind speed interval // *J. Geophys. Res.*—2005.—**110**.—A12211.—doi:10.1029/2005JA011007.
24. *Samson J. C., Harrold B. G., Ruohoniemi J. M., Walker A. D. M.* Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.*—1992.—**19**.—P. 441.
25. *Singer H. J.* Multisatellite observations of resonant hydromagnetic waves // *Planet. Space Sci.*—1982.—**30**.—P. 1209.
26. *Southwood D. J.* Some features of field line resonances in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.*—1974.—**22**.—P. 483.
27. *Southwood D. J., Kivelson M. G.* The effect of parallel inhomogeneity on magnetospheric hydromagnetic wave coupling // *J. Geophys. Res.*—1986.—**91**.—P. 6871.
28. *Tamao T.* Transmission and coupling resonance of hydromagnetic disturbances in the non-uniform Earth's magnetosphere // *Sci. Rep. Tohoku Univ.*—1965.—**5**.—17.—P. 43.
29. *Takahashi K., Cheng C. Z., McEntire R. W., et al.* Observation and theory of Pc5 waves with harmonically related transverse and compressional components // *J. Geophys. Res.*—1990.—**95A**, N 2.—P. 977—989.

Поступила в редакцию 26.11.09