

НАБЛЮДЕНИЯ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В НОЧНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО КОГЕРЕНТНОГО СРЕДНЕШИРОТНОГО РАДАРА

М.А. Челпанов, О.В. Магер, П.Н. Магер, Д.Ю. Климушкин, О.И. Бернгардт

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
max_chel@iszf.irk.ru

PROPERTIES OF LONG-PERIOD PULSATIONS OBSERVED WITH EKATERINBURG COHERENT MIDLATITUDE RADAR IN THE NIGHTSIDE MAGNETOSPHERE

M.A. Chelpanov, O.V. Mager, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin, O.I. Berngardt

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

Аннотация. Рассмотрены УНЧ-пульсации, наблюдаемые в ночной магнитосфере с помощью Екатеринбургского когерентного радара. Представлены случаи наблюдения дрейфово-компрессионных волн. Для анализа привлечены данные о магнитном поле и плотности частиц в магнитосфере, полученные с помощью спутников в период наблюдения волн. Сравнительный анализ показал, что в большинстве случаев наблюдаемые на радаре волны имеют частоту ниже собственной частоты колебания силовых линий и, вероятно, имеют кинетическую природу.

Ключевые слова: ВЧ-радар, УНЧ-волны.

Abstract. The analysis of ULF pulsations observed with the Ekaterinburg Coherent Radar in the nightside magnetosphere is implemented. The work presents drift-compressional wave observation cases. We used THEMIS and Van Allen Probes in-situ data on magnetic field and particle density during radar wave registration. The analysis shows that the majority of the oscillations feature frequencies that are much lower than fundamental poloidal Alfvén eigenmode frequency and therefore could have kinetic nature.

Keywords: high-frequency radar, ULF waves.

Более 30 лет для исследования ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний в магнитосфере используются радары. Некоторую трудность в процесс изучения вносит многообразие как источников волн в пределах одного частотного диапазона, так и их структуры. Колебания могут проникать в магнитосферу из солнечного ветра, возбуждаться вблизи ее границы неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца или ударной волной [Мишин и др., 2013]. Источниками УНЧ-волн внутри магнитосферы могут служить, например, переменные токи, созданные дрейфующими частицами и неустойчивости в плазме.

Источники колебаний с низким азимутальным волновым числом m относятся к последней группе — они находятся внутри магнитосферы, поскольку лишь малая часть энергии волн с малыми m может проникнуть в магнитосферу извне [Гульельми, Потапов, 1984]. Часто такие колебания относят к альфвеновским, однако исследования показывают, что их в некоторых случаях следует относить к другим модам, например, дрейфово-компрессионной [Челпанов и др., 2016]. В работе мы попытались определить, какая доля наблюдаемых на радаре в ночной магнитосфере колебаний относится к альфвеновской моде. Кроме того, приведены случаи наблюдения дрейфово-компрессионной моды. Для этих целей помимо радарных наблюдений использованы данные спутников Van Allen Probes и THEMIS.

Екатеринбургский когерентный радар действует по принципу радара системы SuperDARN. Он работает на частоте около 10.5 МГц и принимает сигнал, отраженный от мелкомасштабных ионо-

сферных неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля. По доплеровскому смещению определяется скорость плазмы в ионосфере. Угол обзора радара составляет около 50° , он разделен на 16 секторов, или лучей. Три из них работают в специальном режиме, обеспечивающем временное разрешение данных в 18 с. Оно дает возможность регистрировать колебания скорости плазмы с периодами 36 с и более. Один из этих лучей направлен примерно на магнитный полюс, другой — на географический. Третий луч расположен посередине между ними. Таким образом, мы можем регистрировать компоненту скорости плазмы, близкую к меридианальной.

Считается, что мелкомасштабные изменения скорости ионосферной плазмы происходят из-за $E \times B$ дрейфа, вызванного магнетосферными УНЧ-волнами [Wright, Yeoman, 1999; Yeoman et al., 2012]. Поскольку лучи высокого разрешения в нашем случае направлены примерно на магнитный полюс, мы можем получать радиальную компоненту магнитного возмущения. На рис. 1 приведен график скорости плазмы в ионосфере для 25 декабря 2014 г., на нем хорошо видны периодические колебания. Мы обнаружили шесть случаев наблюдения колебаний на радаре, сопровождающихся колебаниями в данных спутника, пересекающего тот же долготный сектор. Среди них и вышеупомянутый случай 25 декабря 2014 г., на котором мы остановимся подробнее.

Геомагнитная обстановка в этот день — восстановительная фаза слабой магнитной бури. Плотность частиц в солнечном ветре в среднем составляла 3 см^{-3} , его скорость достигала 550 км/с под

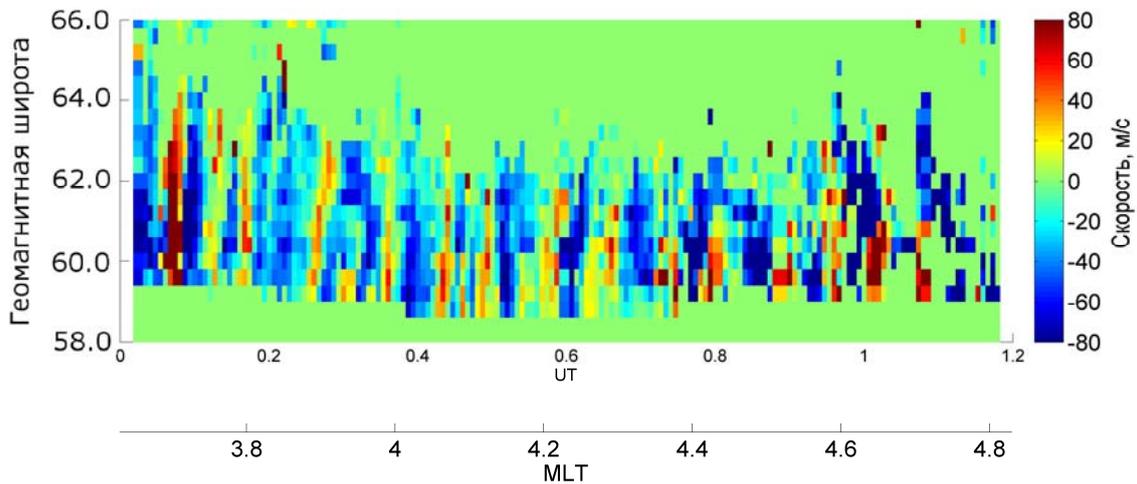


Рис. 1. Скорости плазмы вдоль луча 0. 25 декабря 2014 г.

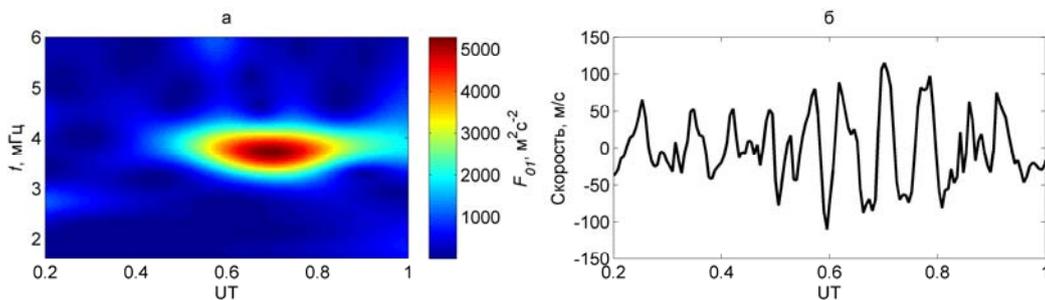


Рис. 2. Кросс-вейвлет-спектр для рядов данных, полученных вдоль лучей 1 и 2 в одном из диапазонов дальности (а), колебания скорости плазмы в области вдоль луча 1 в том же диапазоне дальности (б)

воздействием высокоскоростного потока из корональной дыры. Продолжительный период направленного к югу магнитного поля привел к авроральной активности.

Для анализа колебаний привлечены данные спутника Van Allen Probes RBSP-B, которым также наблюдались эти колебания. Спутник в это время тоже находился в послеполночном секторе, на расстоянии от земли от 4 до 5 радиусов.

Частота колебаний, зарегистрированных при помощи радара примерно равна 3.8 мГц; они наблюдались около получаса в послеполночном секторе (рис. 2). На спутнике зарегистрированы колебания с близкими частотами, около 4.2 мГц. На рис. 3 показаны радиальная и продольная компоненты. В азимутальном направлении колебания слабые, они не показаны.

Колебания могли быть вызваны приходом горячих протонов с энергиями до 10 кэВ — в интервале 00:01 UT в данных спутника наблюдалось значительное увеличение их потоков.

На рис. 4 показаны колебания продольной компоненты поля и возмущение потока протонов ($\delta J/J$) с энергией 5.23 кэВ. Видно, что эти колебания находились в противофазе. Таким же образом колебания продольной компоненты находились в противофазе с колебаниями давления частиц в данных спутника. Такие особенности характерны для дрейфово-компрессионной волны.

Одним из признаков дрейфово-компрессионной волны является то, что ее частота ниже частоты собственных колебаний силовых линий в магни-

тосфере. Мы использовали данные о параметрах плазмы и магнитного поля чтобы смоделировать альфвеновскую частоту на магнитной оболочке, на которой были зарегистрированы колебания. Зная концентрацию частиц и величину поля в определенной точке в секторе наблюдения радаром волн, мы использовали приближение дипольного магнитного поля и степенной закон распределения частиц вдоль силовой линии. Таким образом, мы оценили альфвеновскую частоту на этой оболочке. Она находится в диапазоне 16–28 мГц, что существенно выше значений, полученных по результатам радарных и спутниковых наблюдений. Это является дополнительным аргументом в пользу кинетической природы волн.

В работе [Челпанов и др., 2016] также представлен случай наблюдения дрейфово-компрессионной волны в магнитосфере. В ней главным аргументом в пользу гипотезы о природе колебаний стала зависимость частоты от азимутального волнового числа. Представляет интерес вопрос о том, какая часть наблюдаемых с помощью радара волн с большими m относится к альфвеновской моде, и какая имеет иную природу. Мы провели анализ 16 случаев наблюдения на радаре волн, в которых были доступны данные спутников Van Allen Probes или THEMIS для долготного сектора наблюдений и соответствующих магнитных оболочек. Аналогично описанному выше случаю мы оценили альфвеновские частоты по параметрам плазмы и магнитного поля на орбите и сравнили их с радарными наблюдениями. На рис. 5 показано распределение колеба-

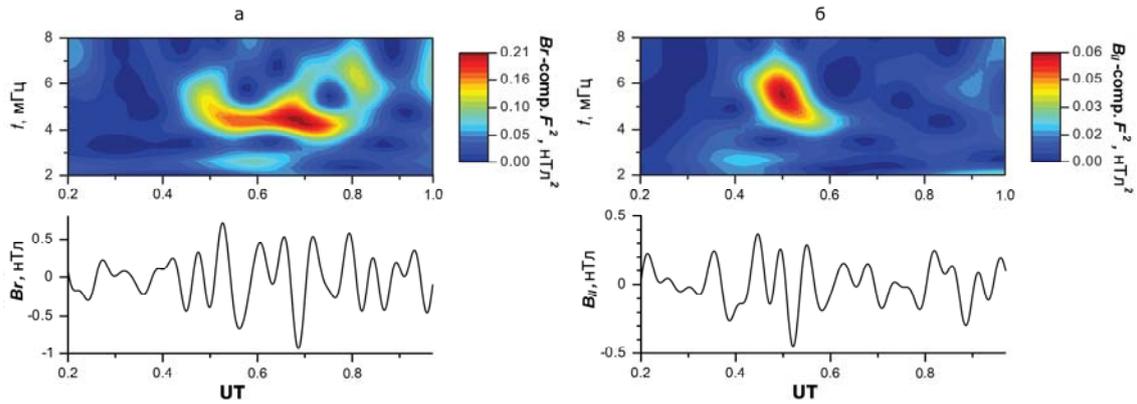


Рис. 3. Радиальная (а) и продольная (б) компоненты магнитного поля (внизу) и их вейвлет-спектры, полученные по данным Van Allen Probes

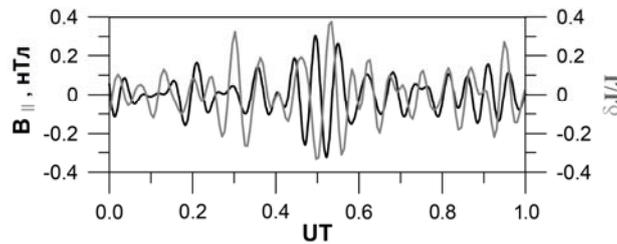


Рис. 4. Возмущение продольной ($V_{||}$) компоненты магнитного поля и потока протонов ($\delta J/J$) с энергией 5.23 кэВ

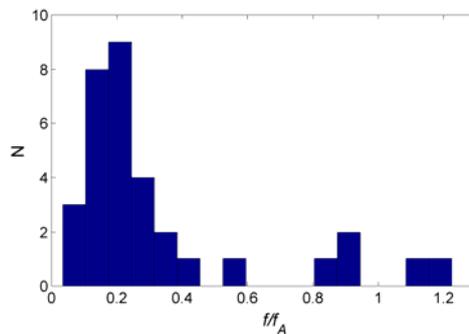


Рис. 5. Распределение частот колебательных гармоник по отношению ff_A по всем событиям

тельных гармоник по отношению ff_A , где f — частота колебательной гармоника, а f_A — соответствующая альфвеновская частота (во время одного события наблюдались от одной до четырех гармоник). Из распределения видно, что 28 из 33 гармоник имеют частоты ниже альфвеновской и отличаются от нее более чем на 40 %. Для остальных пяти гармоник или части из них соотношение ff_A , с учетом неточности использованных моделей, вероятно в действительности может равняться единице, что может быть свидетельством того, что они относятся к альфвеновской моде.

Таким образом, более 80 % из проанализированных колебательных гармоник, зарегистрированных с помощью екатеринбургского радара в ночной магнитосфере, не могут относиться к альфвеновской моде, так как их частоты существенно ниже. Вероятно, их можно отнести к дрейфово-компрессионной моде [Crabtree et al. 2003].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00254-а. Экспериментальные данные получены с использованием радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН.

Список литературы

- Гульельми А.В., Потапов А.С. Об особенностях поля МГД-волны в неоднородной плазме // Иссл. по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца. М.: Наука, 1984. Вып. 70. С. 149–157.
- Мишин В.В., Клибанова Ю.Ю., Цэгмэд Б. Влияние наклона фронта неоднородности солнечного ветра на свойства вызванных им длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Косм. иссл. 2013. Т. 51, № 2. С. 107–118.
- Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. и др. Наблюдения дрейфово-компрессионных волн с помощью среднеширотного декаметрового когерентного радара // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 46–56.
- Wright D.M., Yeoman T.K. CUTLASS observations of a high- m ULF wave and its consequences for the DOPE HF Doppler sounder // Ann. Geophys. 1999. V. 17. P. 1493–1497.
- Yeoman T.K., James M., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. SuperDARN observations of high- m ULF waves with curved phase fronts and their interpretation in terms of transverse resonator theory // J. Geophys. Res. 2012. V. 117.
- Crabtree C., Horton W., et al. Bounce-averaged stability of compressional modes in geotail flux tubes // J. Geophys. Res. 2003. V. 108.