

# ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДРЕЙФОВЫХ КОМПРЕССИОННЫХ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО КОГЕРЕНТНОГО ДЕКАМЕТРОВОГО РАДАРА И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

*Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук*

**Аннотация.** Наблюдения с помощью радара, дополненные анализом спутниковых данных, являются довольно эффективным методом изучения ультранизкочастотных пульсаций. В работе проведен анализ колебаний скорости плазмы, зарегистрированных в ночной ионосфере с помощью екатеринбургского среднеширотного декаметрового когерентного радара и вызванных магнитосферными пульсациями диапазона Pc5. Мы попытались определить, какая часть из наблюдаемых колебаний может относиться к альфвеновской моде. Используя вейвлет-анализ, определены частоты колебаний и волновые азимутальные числа. На основе данных космических аппаратов Van Allen Probes (RBSP) и THEMIS о концентрации протонов и величине магнитного поля в области магнитосферы, где наблюдались волны, выполнены модельные расчеты частот альфвеновских колебаний. Сравнение показало, что лишь малая часть колебаний, наблюдаемых с помощью радара, имеет частоты близкие к альфвеновским. Большинство колебаний имеют значительно более низкие частоты, возможно, имеет кинетическую природу, и наиболее вероятно являются дрейфово-компрессионными волнами. Также в работе приведен случай одновременного наблюдения таких низкочастотных колебаний по данным спутника и радара.

## 1. Введение

Магнитосферные пульсации являются характерным и неотъемлемым свойством околоземного космического пространства. На их формирование, развитие и распространение оказывает влияние множество процессов, такие как изменение размеров и формы магнитосферы под действием солнечного ветра и появление энергичных частиц в различных ее областях. Свойства пульсаций сильно зависят от характеристик среды, что делает их удобным инструментом для изучения геомагнитных бурь и других процессов. Для регистрации волн с большими азимутальными волновыми числами наиболее подходящими инструментами являются радары, так как такие волны обычно не проникают через атмосферу и поэтому не регистрируются наземными магнетометрами [Апатитов, Черемных, 2011]. Их можно наблюдать и в спутниковых данных, однако радары, предоставляют возможность изучить пространственную структуру колебаний. Дополненные измерениями с помощью спутников, такие данные представляют наиболее полную информацию о магнитосферных ультранизкочастотных (УНЧ) волнах.

В процессе проведения исследований важным этапом является правильное определение природы наблюдаемых волн. В некоторых работах, основанных на анализе радарных данных, пульсации диапазона Pc5 с большими азимутальными волновыми числами относят к альфвеновской моде [Bland et al., 2014, James et al., 2013]. Тем не менее, в других работах [Mager et al., 2015, Chelpanov et al., 2016] показаны случаи наблюдения УНЧ-волн с большими азимутальными волновыми числами, относящихся к другим модам. В частности, в [Chelpanov et al., 2016] показан случай наблюдения волны в данных екатеринбургского когерентного радара, в котором частота колебаний убывала вместе с азимутальным волновым числом  $m$ . Зависимость частоты от  $m$  на фиксированной геомагнитной широте характерна для дрейфовых компрессионных волн.

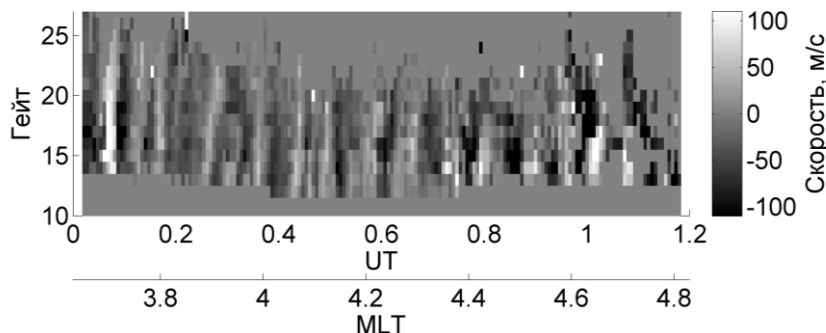
В данной работе представлен анализ ряда событий наблюдения УНЧ-колебаний с помощью екатеринбургского радара. Целью исследования было определить, какая часть из наблюдаемых колебаний не может быть отнесена к альфвеновскому резонансу силовых линий.

## 2. Оборудование

Екатеринбургский когерентный среднеширотный радар регистрирует отражения от ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля. Его поле обзора разделено на 16 лучей с угловым расстоянием между соседними лучами в три градуса. Три из них работают в специальном режиме, обеспечивающем временное разрешение в 18 секунд вдоль каждого направления. Это дает возможность анализировать колебания скорости ионосферной плазмы с периодами от 36 секунд. Благодаря близкому расположению лучей, работающих в этом режиме, можно определить направление распространения волн и их длину. Один из лучей направлен примерно на магнитный полюс, второй — на географический, третий расположен между ними. В радиальном направлении радар принимает сигнал из диапазона расстояний 200–

3000 км, для используемых в работе лучей это примерно соответствует 55–77 градусам геомагнитной широты. Этот интервал разделен на 75 диапазонов дальности, или гейтов, охватывающих по 45 градусов в радиальном направлении. Частота излучения радара примерно равна 10,5 МГц.

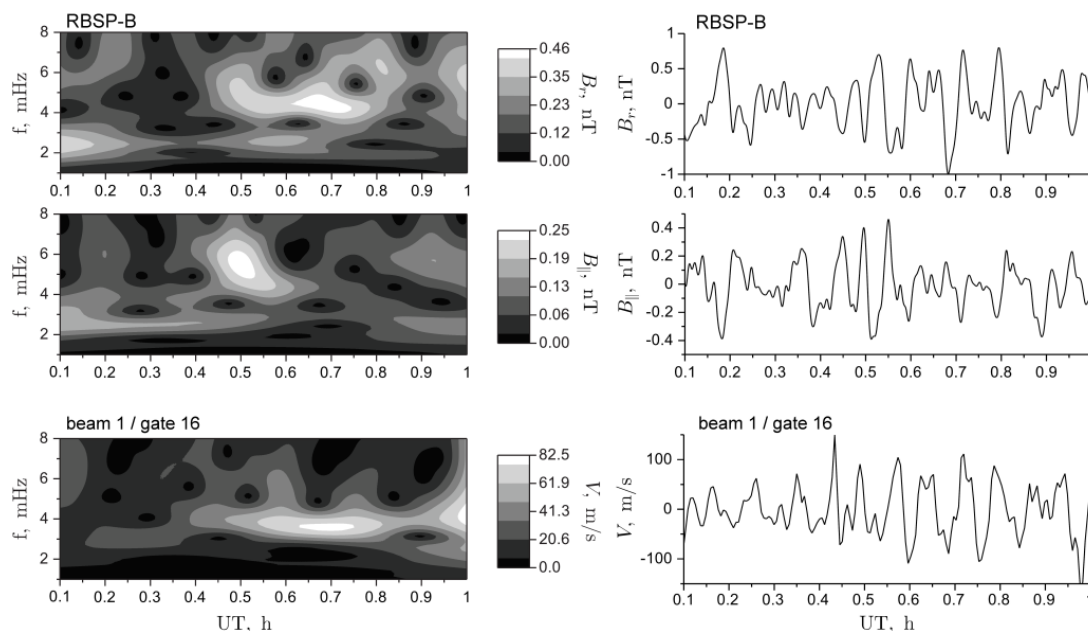
Анализ параметров плазмы в магнитосфере выполнен на основе данным спутников Van Allen Probes (RBSP) и THEMIS ([http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public/](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/)).



**Рисунок 1.** Скорость плазмы вдоль луча 0. 25 декабря 2014 г.

### 3. Событие 25 декабря 2014 г.

Пульсации скорости ионосферной плазмы, регистрируемые радаром, вызваны электрическим полем магнитосферных УНЧ-волн. Поскольку лучи высокого разрешения направлены примерно вдоль магнитного меридиана, они регистрируют колебания скорости ионосферных неоднородностей, связанные с азимутальной компонентой электрического поля, которая соответствует радиальной компоненте магнитного поля. На рис. 1 показан пример таких колебаний. Двадцать пятого декабря 2014 г. в ночной ионосфере радаром были зарегистрированы колебания скорости ионосферной плазмы с амплитудой до 80 м/с. Такие скорости соответствуют колебаниям электрического поля с амплитудами около 4 мВ/м. Пик амплитуды колебаний пришелся на 00:25 -01:00 UT, что приблизительно соответствует 03:50-04:30 MLT. Максимальные амплитуды колебания наблюдались на расстоянии 540-990 км, вдоль луча 0 эта область соответствует магнитным оболочкам 3.7-4.9 (магнитные оболочки рассчитаны по модели IGRF). Частота колебаний изменялась от 3.3 мГц до 4.0 мГц. Волна распространялась на запад, значения азимутального волнового числа  $m \sim -40$ . Остановимся на этом событии подробнее.



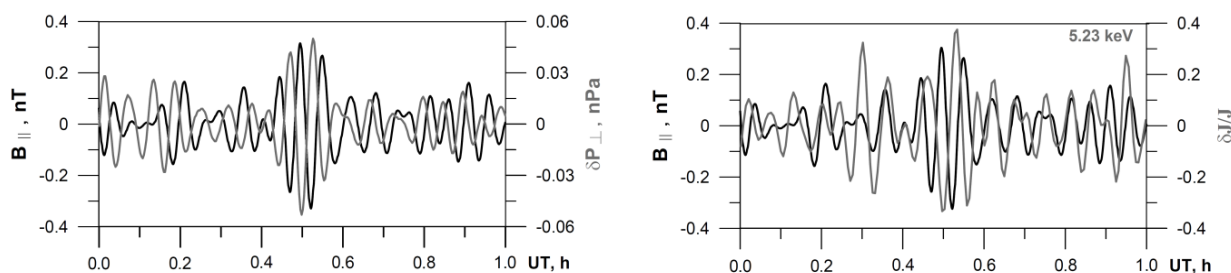
**Рисунок 2.** Вейвлет-преобразование сигнала и его форма для радиальной и продольной компонент магнитного поля на спутнике RBSP-B (вверху) и данных радара, луч 1, гейт 16 (внизу). 25 декабря 2014 г.

Геомагнитное поле в день наблюдения колебаний соответствовало слабо возмущенному уровню. Плотность солнечного ветра была низкой и составляла в среднем  $3 \text{ см}^{-3}$ . Его скорость достигала 550 км/с под

воздействием высокоскоростного потока из корональной дыры (СН647). Максимальные значения планетарного индекса Кр достигали значений 3+. На основе авроральных индексов и данных наземных обсерваторий зарегистрировано усиление суббуравой активности, вызванной переориентацией  $B_z$ -компоненты ММП и ее длительными отрицательными значениями. Это привело к развитию кольцевого тока (минимальные значения SYM-H = -41 нТл).

Одновременно с радаром на спутнике Van Allen Probes (RBSP-B) зарегистрированы колебания с близкими по значению частотами, порядка 4.2 мГц. В этот момент спутник находился в послеполуночном секторе магнитосферы на 3.0-4.1 MLT, и двигался в направлении Земли от  $L= 4.8 - 4.0 R_E$ . Событие происходило в области с низкой плотностью протонов за пределами плазмосферы.

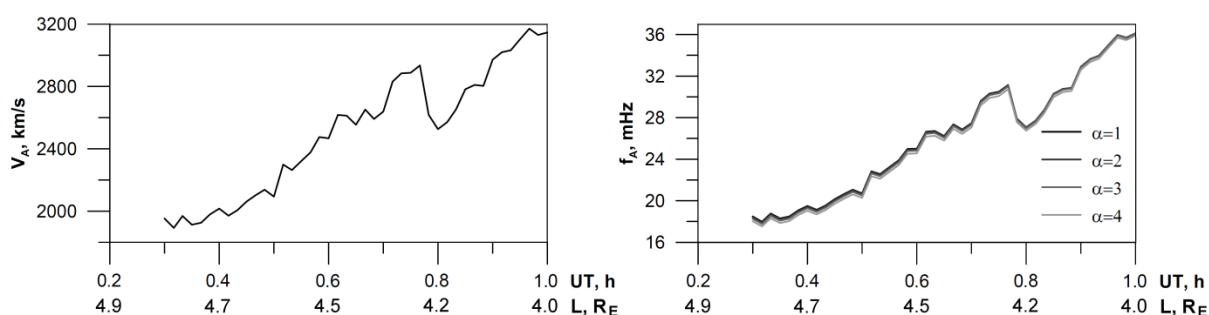
На рис. 2 представлены колебания, отфильтрованные в диапазоне Pc5, радиальной ( $B_r$ ) и продольной ( $B_{||}$ ) компоненты магнитного поля и их вейвлет спектры. Азимутальная компонента не представлена т.к. имеет значительно слабее колебания. В нижней части рисунка приведены колебания и их спектр по данным радара.



**Рисунок 3.** Слева: возмущение продольной ( $B_{||}$ ) компоненты магнитного поля (черным) и возмущение давления ( $\delta P_{\perp}$ , серым) по данным RBSP-B. Справа: возмущение продольной ( $B_{||}$ ) компоненты магнитного поля (черным) и возмущение потока протонов ( $\delta J/J$ ) с энергией 5.23 keV по данным того же спутника.

На рис. 3 показано возмущение продольной компоненты магнитного поля. Для наглядности оно отображено на одном графике с возмущением давления. Кроме того, этот же параметр совмещен на одном графике с потоком протонов с энергией 5,23 keV. Видно, что колебания давления и потоков протонов находятся в противофазе с продольной компонентой волны. Это указывает на компрессионный характер колебаний.

Данные спутника также были использованы для того, чтобы оценить возможность принадлежности волны к альфвеновской моде. На основе измерений параметров плазмы и магнитного поля в магнитосфере мы смоделировали частоту собственных колебаний силовой линии, в основании которой радаром были зарегистрированы колебания, используя приближение дипольного магнитного поля. Таким образом, мы оценили альфвеновскую скорость и, соответственно, собственную частоту колебаний на этой оболочке. На тех магнитных оболочках, на которых наблюдались колебания, альфвеновская частота находилась в пределах 16–28 мГц, что в несколько раз превышает частоту колебаний (от 3.3 мГц до 4.0 мГц), зарегистрированных радаром в вариациях скорости ионосферной плазмы (рис. 4). Это является дополнительным аргументом в пользу кинетической природы волны. Наиболее возможным вариантом является дрейфовая компрессионная мода.

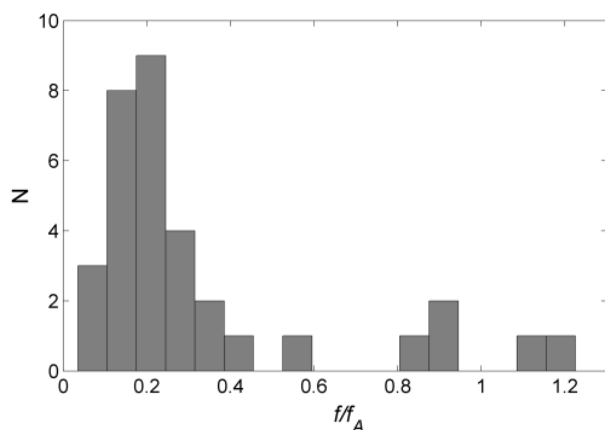


**Рисунок 4.** Модельная альфвеновская скорость ( $V_A$ ) и альфвеновская частота ( $f_A$ ).

#### 4. Обсуждение

Хотя далеко не все колебания, наблюдающиеся с помощью радаров, можно одновременно регистрировать на спутниках, для многих событий имеется возможность получить данные о параметрах среды в магнитосфере во время наблюдений. Мы провели анализ 16 таких случаев, чтобы определить, какая часть из наблюдаемых колебаний может быть отнесена к альфвеновской моде. Спутники Van Allen Probes либо THEMIS в каждом

из этих случаев находились в долготном секторе наблюдений и пересекали соответствующие магнитные оболочки. Так же, как и в случае события 25 декабря, мы оценили альфвеновские частоты по параметрам плазмы и магнитного поля на орбите и сравнили их с радарными наблюдениями. На рис. 5 показано распределение колебаний по отношению  $f/f_A$ , где  $f$  — частота колебаний, 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 5 гармоник соотношение  $f/f_A$  близко к единице, что может быть свидетельством того, что они относятся к альфвеновской моде.



**Рисунок 5.** Распределение частот колебаний по отношению  $f/f_A$  по всем событиям

Таким образом, к альфвеновской моде могут относиться не более 20% из проанализированных колебаний, зарегистрированных с помощью екатеринбургского радара в ночной магнитосфере. Вероятно, остальные колебания, либо их часть можно отнести к дрейфово-компрессионной моде.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках проекта П.16.1.3 Программы ФНИ государственных академий на 2013-2020 годы при поддержке гранта РФФИ 16-05-00254-а. Экспериментальные данные получены с использованием радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН.

## Литература

- А.В. Агапитов, О. К. Черемных, Поляризация резонансных УНЧ-возмущений в магнитосфере Земли, Кинематика и физика небесных тел, 27, 117–123, 2011.
- E.C. Bland, A.J. McDonald, F.W. Menk, J.C. Devlin, Multipoint visualization of ULF oscillations using the Super Dual Auroral Radar Network, Geophys. Res. Lett.41 (2014) 6314–6320. doi:10.1002/2014GL061371.
- M.A. Chelpanov, P.N. Mager, D.Y. Klimushkin, O.I. Bergardt, O.V. Mager, Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study, Journal of Geophysical Research: Space Physics 121 (2) (2016) 1315–1326. doi:10.1002/2015JA022155.
- M.K. James, T.K. Yeoman, P. N. Mager, D.Yu. Klimushkin, The spatio-temporal characteristics of ULF waves driven by substorm injected particles, Journal of Geophysical Research (Space Physics) 118 (2013) 1737–1749. doi:10.1002/jgra.50131.
- P.N. Mager, O.I. Bergardt, D.Yu. Klimushkin, N.A. Zolotukhina, O.V. Mager, First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the EkaterinburgSuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 130131 (0) (2015) 112–126. doi:10.1016/j.jastp.2015.05.017.