

НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСА УНЧ-ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ MMS

М.А. Челпанов, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер

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

ULF WAVE–ELECTRONS DRIFT RESONANCE OBSERVED WITH THE MMS SPACECRAFT

M.A. Chelpanov, D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia
max_chel@iszf.irk.ru

Аннотация. Ультранизкочастотные (УНЧ) волны в магнитосфере могут взаимодействовать как с энергичными протонами, так и с электронами. Однако резонанс волн с электронами наблюдается относительно редко. В работе представлен случай наблюдения волнового события, включающего два пуга колебаний. На спутниках Magnetospheric Multiscale Mission (MMS) колебания были зарегистрированы в послеполуночном секторе в области магнитной оболочки $L \sim 11$. Первый пуг, с амплитудой ~ 1.5 нТл, наблюдался примерно 20 мин, волна имела смешанную поляризацию и существенную продольную компоненту. Второй пуг имел меньшую амплитуду, в магнитном поле волны доминировала азимутальная компонента. Такая трансформация волны может быть объяснена разбеганием по фазам собственных альфвеновских колебаний силовых линий. Волна распространялась на восток, ее азимутальное волновое число составляло примерно 25.

Одновременно с волной на спутниках было зарегистрировано облако энергичных электронов, инжектированных в магнитосферу во время суббури. Интенсивность потока частиц менялась с частотой волны (3 мГц). Источником колебаний, вероятно, был дрейфовый резонанс с электронами с энергией ~ 89 кэВ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-10139.

Ключевые слова: УНЧ-волны, взаимодействие волна — частица, магнитосфера.

Abstract. Ultra-low frequency waves in the magnetosphere are known to interact both with energetic protons and electrons. However, electron-wave resonance is a relatively rare phenomenon in observations. In this study, we present a case of the wave event that includes two wave packets. The Magnetospheric Multiscale Mission spacecraft registered the oscillations in the post-midnight sector of the magnetosphere at a distance of about 11 RE. The first wave packet with amplitude of about 1.5 nT was registered during ~ 20 minutes. It features mixed polarization with considerable field-aligned component. The second one had predominantly azimuthal polarization and a lower amplitude. This complies with the theory of Alfvén wave transformation due to phase mixing. The wave was propagating to the east and had azimuthal wavenumber $m \sim 25$.

Simultaneously, a cloud of substorm-injected energetic electrons was registered by the spacecraft. The flux was modulated with the wave frequency (3 mHz). The oscillations were apparently induced via drift resonance, with the resonance energy of about 89 keV.

The study was supported by the Russian Science Foundation under Grant 21-72-10139.

Keywords: ULF waves, wave — particle interaction, magnetosphere.

Ультранизкочастотные (УНЧ) волны эффективно взаимодействуют с энергичными частицами в магнитосфере, перенося их энергию в энергию колебаний и замедляя их, либо, наоборот, ускоряя при передаче им энергии. Такие взаимодействия могут влиять на состав и распределение по питч-углам частиц, участвовать в их переносе поперек магнитных оболочек.

Большое значение при взаимодействии волна — частица играют азимутальное направление распространения волны, а также величина азимутального волнового числа m . Азимутально-крупномасштабные волны (m порядка единиц) связывают с источниками в солнечном ветре или на границе магнитосферы [Chen, Hasegawa, 1974; Southwood, 1974]. Для азимутально-мелкомасштабных волн (m порядка десятков) источниками энергии служат взаимодействия с потоками заряженных частиц внутри магнитосферы. Волны, распространяющиеся на восток ($m > 0$), могут эффективно взаимодействовать с электронами, которые в магнитном поле Земли также дрейфуют на восток. При распространении на запад ($m < 0$) волны могут обмениваться энергией с положительно заря-

женными ионами. От величины азимутального волнового числа зависит резонансная энергия частиц, поскольку от их энергии зависит скорость азимутального дрейфа в магнитосфере.

Волны с $m > 0$, распространяющиеся на восток, наблюдаются реже волн, распространяющихся на запад [Eriksson et al., 2006; Le et al., 2011]. Часто они регистрируются к востоку от суббуревых инъекций — в направлении распространения электронов [James et al., 2013; Hori et al., 2018].

В работе рассмотрен случай наблюдения распространяющейся на восток азимутально-мелкомасштабной волны, зарегистрированной с помощью спутников Magnetospheric Multiscale Mission (MMS). Рассмотрено ее взаимодействие с потоком энергичных электронов, показано, что источником колебаний был дрейфовый резонанс.

Система спутников MMS представляет собой четыре аппарата на эллиптической орбите с наклоном относительно географического экватора около 28° [Burch et al., 2016]. Главная цель спутниковой миссии — получение данных о процессах в области магнитных пересоединений с высоким временным

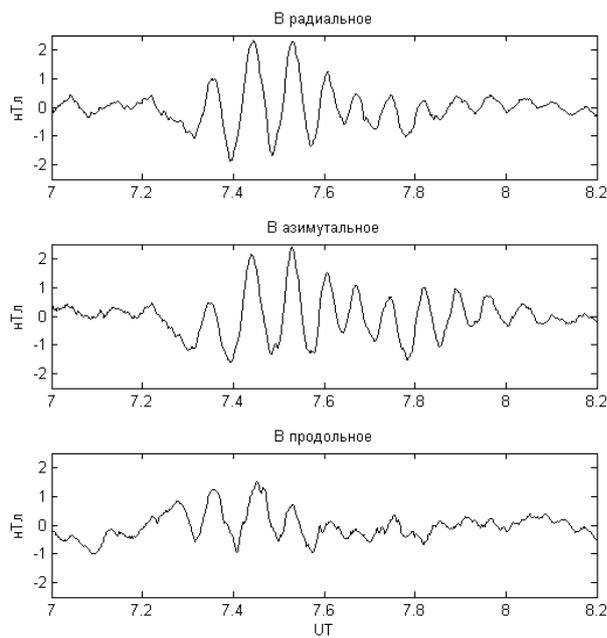


Рис. 1. Магнитное поле в координатах, ориентированных вдоль локального магнитного поля (фильтрация оконным фильтром 40 мин)

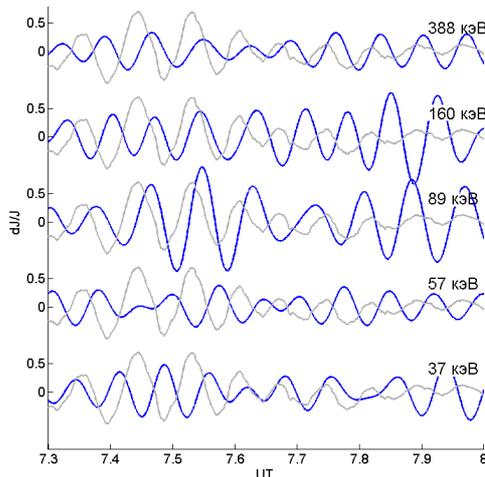


Рис. 2. Относительные изменения потоков электронов различных энергий (синий). Радиальная компонента магнитного поля (серый)

разрешением, но MMS также хорошо подходит для изучения процессов внутри магнитосферы. Спутники MMS расположены в форме тетраэдра, что позволяет, помимо полного вектора магнитного и электрического полей, получать градиенты и роторы величин.

Измерения магнитного поля преобразовывались к системе координат, сориентированной вдоль локального магнитного поля, с осями X и Y поперек силовой линии, от Земли и на восток соответственно, и осью Z вдоль поля. Волна в данных о магнитном поле была зарегистрирована 07.07.2020 г. в период 07:20–08:05 UT (рис. 1). В этот время спутники двигались в направлении Земли в послеполуночном секторе, пересекая магнитные оболочки 9–11. Волна включала в себя два пакета колебаний. Первый (07:20–07:40 UT) имел смешанную поляризацию, азимутальная и радиальная компоненты колебаний

были практически одинаковы по амплитуде. Частота постепенно возрастала с 3 до 4 мГц. Во втором пакете, с частотой 4 мГц, азимутальная компонента магнитного поля превышала радиальную примерно в два раза. Амплитуда волны достигала 1.5 нТл. В первом волновом пакете продольная компонента магнитного поля была существенной, с амплитудой до 1 нТл, во втором она была мала. При сравнении данных спутников было определено, что волна распространялась на восток и в сторону Земли, азимутальное волновое число $m \sim 25$.

Одновременно с наблюдением волны на спутниках была зарегистрирована модуляция потоков энергичных электронов. Частота модуляции совпадала с частотой волны. Наибольшая модуляция наблюдалась для частиц с энергией 89 кэВ. Для электронов этой энергии разность фаз между радиальной компонентой волны и модуляцией потока была около 90° , что соответствует условию дрейфового и дрейфово-баунсового резонансов.

Отношение давлений плазмы и магнитного поля β было в пределах 0.1–0.2, что является малой величиной для выполнения условий дрейфово-зеркальной неустойчивости. В распределении частиц по энергиям не наблюдалось инверсного участка (большого количества частиц с меньшими энергиями), что исключает появление неустойчивости, связанной с таким распределением по энергиям. Однако наблюдался положительный пространственный градиент функции распределения в радиальном направлении. Это является условием градиентной неустойчивости. Показано, что выполнялись условия дрейфового резонанса с энергичными электронами, который, вероятно, и являлся источником энергии волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Burch J.B., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. Magnetospheric multiscale overview and science objectives. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 199, iss. 1–4. P. 5–21. DOI: [10.1007/s11214-015-0164-9](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9).
- Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, iss. 7. P. 1024–1032. DOI: [10.1029/JA079i007p01024](https://doi.org/10.1029/JA079i007p01024).
- Eriksson P.T.I., Blomberg L.G., Glassmeier K.-H. Cluster satellite observations of mHz pulsations in the dayside magnetosphere. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 38. P. 1730–1737. DOI: [10.1016/j.asr.2005.04.103](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.103).
- James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Y. The spatio-temporal characteristics of ULF waves driven by substorm injected particles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 1737–1749. DOI: [10.1002/jgra.50131](https://doi.org/10.1002/jgra.50131).
- Hori T., Nishitani N., Shepherd S.G., et al. Substorm-associated ionospheric flow fluctuations during the 27 March 2017 magnetic storm: SuperDARN-Arase conjunction. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, iss. 18. P. 9441–9449. DOI: [10.1029/2018GL079777](https://doi.org/10.1029/2018GL079777).
- Le G., Chi P.J., Strangeway R.J., Slavin J.A. Observations of a unique type of ULF wave by low-altitude Space Technology 5 satellites. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. A08203. DOI: [10.1029/2011JA016574](https://doi.org/10.1029/2011JA016574).
- Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1974. Vol. 22, iss. 3. P. 483–491. DOI: [10.1016/0032-0633\(74\)90078-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(74)90078-6).