

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УНЧ-ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

<sup>1</sup>А.В.Рубцов, <sup>2</sup>М. Нозе

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
avrubtsov@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>Институт исследований околоземного космического пространства, Нагойский университет, Нагоя, Япония

## INFLUENCE OF THE PLASMASPHERE ON SPATIAL DISTRIBUTION OF ULF WAVES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

<sup>1</sup>A.V. Rubtsov, <sup>2</sup>M. Nosé

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
avrubtsov@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan

**Аннотация.** В работе показано распределение частоты встречаемости ультранизкочастотных (УНЧ) волн с периодами от 45 до 600 с в магнитосфере Земли относительно положения плазмопаузы. Список волн получен в результате обработки данных спутника Arase за 46 мес. Положение плазмопаузы определялось тремя методами: по электронной концентрации, по профилю альфвеновской скорости и по эмпирическим моделям. Обнаружено, что УНЧ-волны чаще всего встречаются за пределами плазмосферы, причем полоидальные и тороидальные волны демонстрируют изменение своего распределения при сжатии/расширении плазмосферы во время геомагнитных возмущений. Отмечено, что компрессионные волны не показывают такой закономерности.

**Ключевые слова:** УНЧ-волны, магнитосфера, плазмосфера, плазмопауза, альфвеновская скорость.

**Abstract.** The paper shows distribution of the occurrence rate of ultra-low-frequency waves (ULF) with periods from 45 to 600 s. in the Earth's magnetosphere relative to the plasmopause location. We processed 46 months of Arase satellite data to obtain a list of waves. Plasmopause locations were determined by three methods: from electron density, from Alfvén velocity, and from empirical models. We found that ULF waves are more common outside the plasmasphere, and poloidal and toroidal waves demonstrate different distributions during compression/expansion of the plasmasphere under geomagnetically disturbed/quiet conditions. Note that compressional waves did not show such dependence.

**Keywords:** ULF waves, magnetosphere, plasmasphere, plasmopause, Alfvén velocity.

### ВВЕДЕНИЕ

В структуре магнитосферы Земли особое место занимает внутренняя часть, примерно от  $3R_E$  до  $7R_E$  от центра Земли ( $R_E$  — радиус Земли, 6371 км). В эту область попадает внешний радиационный пояс, кольцевой ток и граница плазмосферы — плазмопауза. В то же время в переносе энергии внутри магнитосферы, включая ускорение заряженных частиц, важную роль играют ультранизкочастотные (УНЧ) волны с периодами от 0.2 до 600 с [Rankin et al., 2020]. Волны с самыми большими периодами, классифицируемые как Pc3–5, представляют особый интерес, поскольку часто являются собственными колебаниями силовых линий магнитного поля Земли и их можно описать с помощью магнитной гидродинамики (МГД) [Walker, 2005; Zong et al., 2017]. Плазмопауза, представляющая собой резкое падение электронной концентрации в десятки раз, является природным резонатором для альфвеновских волн [Leonovich et al., 2021].

В данной работе по результатам наблюдений спутника Arase [Miyoshi et al., 2018] за 46 мес. построены распределения частоты появления УНЧ-волн диапазонов Pc4 и Pc5 в магнитосфере Земли. Особое внимание уделено распределению относительно положения плазмопаузы и геомагнитным условиям.

### НАБОР ДАННЫХ

В работе были использованы измерения вектора магнитного поля инструментом Magnetic Field Experiment (MGF) [Matsuoka et al., 2018] и электронной

концентрации инструментом High Frequency Analyzer (HFA) системы Plasma Wave Experiment (PWE) [Kumamoto et al., 2018] с марта 2017 г. по декабрь 2020 г. За данный временной промежуток был сформирован каталог волновых событий диапазона частот Pc4 (6.7–22.2 мГц) и Pc5 (1.7–6.7 мГц) с амплитудой более 0.25 нТл. Если наибольшую амплитуду имеют колебания радиальной компоненты магнитного поля, то волна относится к полоидальным, если азимутальной — к тороидальным, если вдоль магнитного поля — к компрессионным.

Полученный набор данных соответствует трем полным обзорам магнитосферы спутником Arase. Необходимо отметить, что спутник Arase имел большой наклон орбиты к геомагнитному экватору, достигающий  $40^\circ$ , поэтому с ростом L происходит и рост магнитной широты. На рис. 1 показаны распределения частоты появления волн в экваториальной плоскости L–MLT. Обнаружено, что тороидальные волны встречаются чаще всего и сосредоточены в ночной полусфере магнитосферы с предполуночным и утренним максимумами. Полоидальные волны часто встречаются вдоль пути дрейфа ионов от полуночи к утру с несколькими локальными максимумами. Компрессионные волны встречаются реже всего и локализованы около геомагнитного экватора, что отображается на рис. 1 как отсутствие компрессионных волн на  $L > 7$ . При этом компрессионные волны имеют два диаметрально противоположных максимума частоты появления при MLT=10 и MLT=22, что примерно соответствует наклону спирали Паркера на орбите Земли.

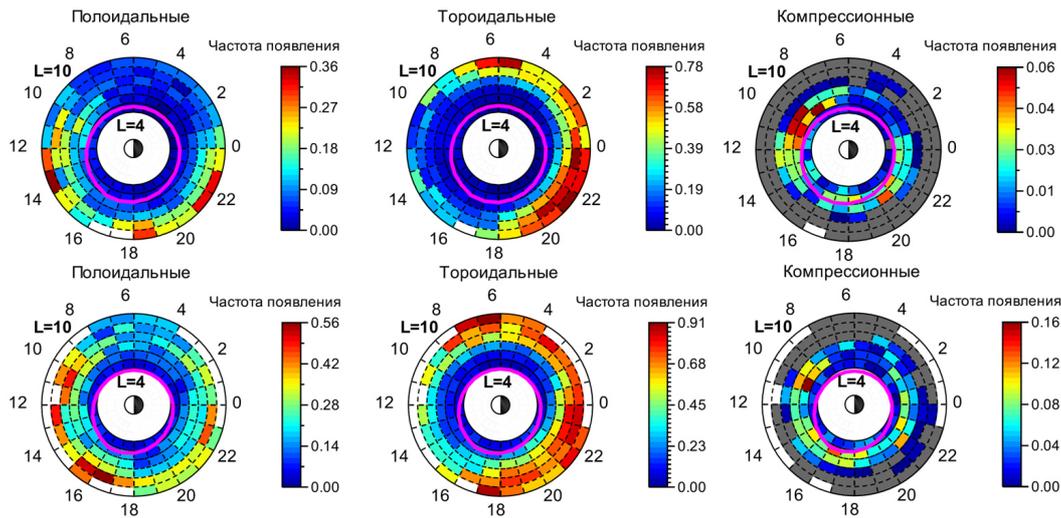


Рис. 1. Распределения частоты появления полюидальных (слева), тороидальных (по центру) и компрессионных (справа) волн в магнитосфере при спокойных (сверху),  $|SYM-H| < 10$  нТл, и возмущенных (снизу),  $|SYM-H| > 10$  нТл, геомагнитных условиях. Розовая линия показывает плазмопаузу по модели NSW-GDP, усредненную внутри каждого поднабора событий. Серые ячейки означают, что частота появления волн равна нулю, а белые ячейки — что время пребывания спутника в ячейке меньше 10 ч

### ПОЛОЖЕНИЕ ПЛАЗМОПАУЗЫ

Плазмопауза играет важную роль для УНЧ-волн в магнитосфере Земли, поскольку разделяет области, в которых концентрация заряженных частиц отличается на порядки [Leonovich et al., 2015]. В спутниковых данных плазмопаузу можно определить по падению электронной концентрации в пять и более раз на интервале в  $0.5R_E$  или меньше [Carpenter, Anderson, 1992]. В то же время для МГД-волн более критичным является величина альфвеновской скорости. В этом случае плазмопауза определяется по изменению знака радиального градиента на положительный [Fraser et al., 1988]. Результаты применения обоих методов определения плазмопаузы показаны на рис. 2 и оказались очень похожи, а расхождение может быть объяснено неточностями в расчете альфвеновской скорости из-за трудности определения реальной средней массы ионов. Всего было определено 3488 пересечений плазмопаузы по профилю концентрации и 2535 — по профилю альфвеновской скорости со средним положением  $L=5.17 \pm 1.08$  и  $L=5.17 \pm 1.21$  соответственно.

Поскольку реальные данные электронной концентрации доступны далеко не для каждого витка орбиты спутника и нередко имеют значительные провалы, то для определения распределения УНЧ-волн относительно плазмопаузы применялись расчеты по эмпирической модели NSW-GDP [He et al., 2017; Zhang et al., 2017]. В результате было продемонстрировано, что распределение полюидальных и тороидальных волн зависит от положения плазмопаузы и большинство этих волн наблюдается вне плазмосферы (см. рис. 1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные распределения частоты появления УНЧ-волн в общем совпадают с более ранними работами [Anderson et al., 1990], но имеются разногласия

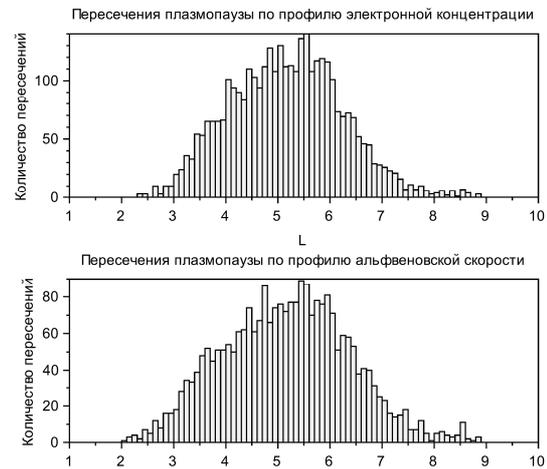


Рис. 2. Распределения пересечений плазмопаузы, выявленных по профилям электронной концентрации (сверху) и альфвеновской скорости (снизу)

с результатами отдельных исследований [Dai et al., 2015; Liu et al., 2009]. Методы определения положения плазмопаузы по профилю электронной концентрации и по профилю альфвеновской скорости показали схожие результаты. Большинство УНЧ-волн находятся за пределами плазмосферы, а ее динамика сильнее всего влияет на распределения полюидальных и тороидальных волн.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10139. Авторы благодарны программе SCOSTEP Visiting Scholar и Центру совместных международных исследований Института исследований околоземного космического пространства Нагойского университета. Авторы благодарят руководителей инструментов MGF, HFA и PWE Аяко Мацуоку, Ёшия Касахару, Ацуши Куямото и Фуминори Цучия, а также руководителя миссии Arase Ику Шинохару и ведущего ученого миссии Arase Ёшидзуми Миёши за предоставленные данные спутника Arase.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Anderson B.J., Engebretson M.J., Rounds S.P., et al. A Statistical Study of Pc3-5 Pulsations Observed by the AMPTE/CCE Magnetic Fields Experiment. 1. Occurrence Distributions. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 10495–10523.
- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 1097–1108.
- Dai L., Takahashi K., Lysak R., et al. Storm time occurrence and spatial distribution of Pc4 poloidal ULF waves in the inner magnetosphere: A Van Allen Probes statistical study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 4748–4762.
- Fraser B.J., McPherron R.L., Russell C.T. Radial Alfvén Velocity Profiles in the Magnetosphere and Their Relation to ULF Wave Field-Line Resonances. *Adv. Space Res.* 1988. Vol. 8. P. 49–52.
- He F., Zhang X.X., Lin R.L., et al. A new solar wind-driven global dynamic plasmopause model: 2. Model and validation. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 7172–7187.
- Kumamoto A., Tsuchiya F., Kasahara Y., et al. High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft. *Earth, Planets and Space.* 2018. Vol. 70. 82.
- Leonovich A.S., Klimushkin D.Y., Mager P.N. Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 5443–5454.
- Leonovich A.S., Zong Q.G., Kozlov D.A., Kotovschikov I.P. The Field of Shock-Generated Alfvén Oscillations Near the Plasmopause. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126. e2021JA029488.
- Liu W., Sarris T.E., Li X., et al. Electric and magnetic field observations of Pc4 and Pc5 pulsations in the inner magnetosphere: A statistical study. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. A12206.
- Matsuoka A., Teramoto M., Nomura R., et al. The ARASE (ERG) magnetic field investigation. *Earth, Planets and Space.* 2018. Vol. 70. 43.
- Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., et al. Geospace exploration project ERG. *Earth, Planets and Space.* 2018. Vol. 70. 101.
- Rankin R., Wang C.R., Wang Y.F., et al. Ultra-Low-Frequency Wave-Particle Interactions in Earth's Outer Radiation Belt. *Dayside Magnetosphere Interactions.* Ed. by Zong Q.G., Escoubet P., Sibeck D., et al. Washington DC: John Wiley & Sons Inc., 2020. P. 189–206.
- Walker A.D.M. *Magnetohydrodynamic Waves in Geospace. The Theory of ULF Waves and Their Interaction with Energetic Particles in the Solar-Terrestrial Environment.* Bristol: IOP Publishing, 2005. 552 p.
- Zhang X.X., He F., Lin R.L., et al. A new solar wind-driven global dynamic plasmopause model: 1. Database and statistics. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 7153–7171.
- Zong Q.G., Rankin R., Zhou X.Z. The interaction of ultra-low-frequency Pc3-5 waves with charged particles in Earth's magnetosphere. *Rev. Modern Plasma Phys.* 2017. Vol. 1. 10.