

## ГЕНЕРАЦИЯ ДНЕВНЫХ Pc4-5 ПУЛЬСАЦИЙ ГРАДИЕНТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПО МНОГОТОЧЕЧНЫМ СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

<sup>1</sup>А.В. Рубцов, <sup>1</sup>О.С. Михайлова, <sup>1</sup>П.Н. Магер, <sup>1</sup>Д.Ю. Климушкин, <sup>2</sup>Ц. Жень, <sup>2</sup>Ц.Г. Цзун

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

<sup>2</sup>Институт космической физики и прикладных технологий, Пекинский университет, Пекин, Китай

## DAYSIDE Pc4-5 PULSATION GENERATION BY GRADIENT INSTABILITY FROM MULTIPOINT SPACECRAFT OBSERVATIONS

<sup>1</sup>A.V. Rubtsov, <sup>1</sup>O.S. Mikhailova, <sup>1</sup>P.N. Mager, <sup>1</sup>D.Yu. Klimushkin, <sup>2</sup>J. Ren, <sup>2</sup>Q.-G. Zong

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

<sup>2</sup>Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing, China

**Аннотация.** В данной работе по одновременным измерениям семи космических аппаратов показано, что роль суббуревых инжекций в генерации УНЧ-волн не является главной. Мы обнаружили, что волны возбуждаются до суббури, а их параметры не изменяются после прибытия новых частиц. Изучена типичная УНЧ-волна на дневной стороне магнитосферы, являющаяся второй гармоникой полоидальной альфвеновской моды, находящаяся в баунс-дрейфовом резонансе с протонами с энергией 100 кэВ. Установлено, что к ее генерации привело образование большого положительного градиента функции распределения протонов на фазе восстановления магнитной бури, а не суббуревые инжекции. Полученные результаты позволили объяснить некоторые предыдущие наблюдения, не имевшие до настоящего момента выводов относительно механизма генерации УНЧ-волн.

**Ключевые слова:** УНЧ-волны, магнитосфера, МГД, суббури, магнитные бури.

**Abstract.** In present work we show that the role of substorm injected particles is not crucial for ULF waves generation using simultaneous observations of seven spacecraft. We found that waves may be excited before the substorm and their characteristics aren't change after new particles arrival. As an example we examined typical ULF wave at the dayside magnetosphere that was a second harmonic poloidal Alfvén wave in a drift-bounce resonance with ~100 keV protons. We determined that the wave was generated by a big positive radial gradient of the proton distribution function at the magnetic storm recovery phase, not by substorm injections. The obtained results allowed us to explain some previous observations that had no conclusions on ULF wave generation mechanism to the moment.

**Keywords:** ULF waves, magnetosphere, MHD, substorms, magnetic storms.

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Земли представляет собой уникальную природную лабораторию для изучения процессов в плазме в магнитном поле. Ультранизкочастотные (УНЧ) волны, охватывающие диапазон частот от 1.7 мГц до 5 Гц, являются важной составляющей переноса энергии внутри магнитосферы и наблюдаются как в космосе, так и на поверхности Земли. Эти волны могут возбуждаться внешними и внутренними источниками, возникающими во время магнитных бурь и суббурь [McPherron, 2005].

Азимутально-мелкомасштабные пульсации (азимутальное волновое число  $|m| \gg 1$ ) в диапазонах Pc4 и Pc5 (период волны 45–600 с) на дневной стороне магнитосферы Земли интенсивно изучаются в последние годы благодаря запуску множества спутниковых миссий. Обычно, эти волны распространяются на запад ( $m < 0$ ) и возбуждаются посредством дрейфового или баунс-дрейфового резонанса с протонами с энергиями от 1 до 100 кэВ [Климушкин и др., 2021]. Передача энергии от частиц волне происходит через внутренние неустойчивости, вызванные не максвелловским распределением протонов или радиальным градиентом функции распределения [Southwood et al., 1969]. Обычно, волны Pc4–5 связывают с альфвеновскими волнами, описываемыми уравнениями магнитной гидродинамики [Dungey, 1954], хотя иногда они могут быть сопоставлены с дрейфово-компрессионными модами [Rubtsov et al., 2018].

В данной работе мы представляем анализ уникального наблюдения волны диапазона Pc4–5 до и во время суббулевой активности на поздней фазе магнитной бури. Волна наблюдалась непредвиденно в течение 15 ч по всей дневной магнитосфере семью спутниками трех миссий. Благодаря этому, нам удалось выявить роль суббулевой инжекции в генерации дневных магнитных пульсаций [Rubtsov et al., 2021].

### ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

Колебания магнитного поля были обнаружены в данных широко разнесенных спутников трех миссий: Van Allen Probes (VAP) [Mauk et al., 2013], Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) [Angelopoulos, 2008] и Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES). В работе использовались измерения магнитного и электрического полей, вычисленные величины давления и концентрации плазмы, а так же данные о потоках протонов с энергиями от 10 до 1000 кэВ.

Космические аппараты непрерывно наблюдали геомагнитные пульсации в течение 15 ч (с 10:00 UT 25 февраля до 01:00 UT 26 февраля 2014 г.) на  $L=4.5-8$  и  $MLT=7-17$  часов (рис. 1). Амплитуда осцилляций радиальной компоненты магнитного поля была в ~2 раза больше, чем азимутальной компоненты и много больше, чем продольной (компрессионной) компоненты, т. е. волна относится к полоидальному типу. Совместные наблюдения показали, что частота

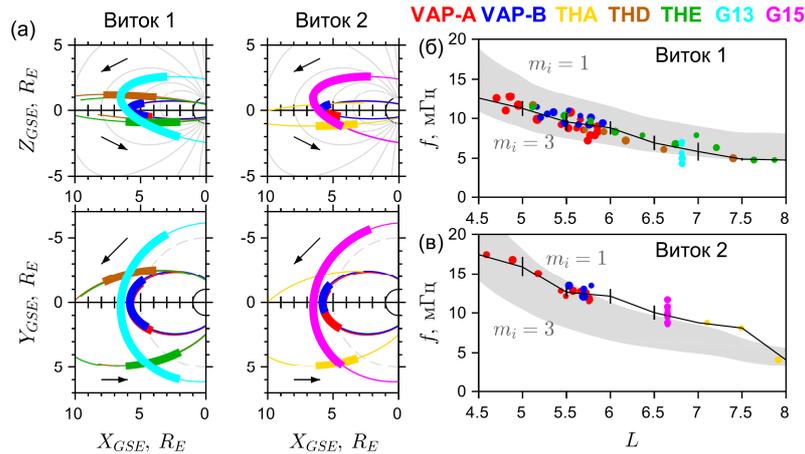


Рис. 1. Орбиты спутников в плоскости XZ (верхний ряд) и XY (нижний ряд) системы координат GSE 25 февраля 2014 г., где стрелками обозначены направления движения спутников (а). Жирные кривые обозначают интервалы наблюдения волны. Левый и правый столбцы соответствуют измерениям на первом и втором витках, соответственно. Точками показаны частоты, извлеченные из вейвлет-спектров радиальной компоненты магнитного поля  $b_r$ , в зависимости от L-оболочки на протяжении (б) первого витка и (в) второго витка спутников VAP. Сплошная черная линия с полосами ошибок является частотой волны, усредненной в ячейках по  $0.5 R_E$ , и среднеквадратичным отклонением. Серая область указывает диапазон собственных частот полюидальной альфвеновской волны для  $m_i=1-3$  а.е.м.

волны изменяется в пределах от 5 до 20 мГц, что соответствует диапазонам Pc4 (6.7–22.2 мГц) и Pc5 (1.7–6.7 мГц).

Спутники VAP-A и VAP-B наблюдали колебания дважды во время двух последовательных орбит, поэтому для удобства мы разделили интервалы наблюдения волны на два витка. Во время третьей последовательной орбиты VAP никаких заметных колебаний магнитного поля в диапазоне Pc4–5 не обнаружено. Спутники A, D и E миссии THEMIS (THA, THD и THE) пролетали насквозь дневную магнитосферу и выявили ступенчатый характер изменений частоты волны от L-оболочки. Геоостационарные спутники GOES 13 и 15 (G13 и G15) измерили одночастотные колебания в широком азимутальном секторе (по всей дневной магнитосфере) на  $L=6.6-6.8$ .

Обнаруженная волна является второй гармоникой альфвеновской волны, как мы выяснили после сравнения ее частоты с вычисленными собственными частотами альфвеновской волны для дипольной модели магнитосферы [Klimushkin et al., 2004]. Наблюдаемая и вычисленная частоты лучше всего согласуются при средней массе ионов  $m_i=1.5$  а.е.м. во время первого витка и  $m_i=1$  а.е.м. во время второго. Уменьшение  $m_i$  между витками приводит к увеличению частоты волны и, вероятно, вызвано распадом кислородного тора после магнитной бури [Nosé et al., 2018].

Первые колебания, зарегистрированные VAP-B в 10:00 UT 25 февраля 2014 г., опередили увеличение AE-индекса на ~28 мин, т. е. волна появилась до того, как инжектированные суббурей частицы достигли внутренней магнитосферы (рис. 2). Спутник G15, который находился в этот момент на ночной стороне, зафиксировал компрессионный импульс, сопровождавший суббуревую инжекцию, через ~22 мин после обнаружения волны. Несколько суббуревых инжекций, происходивших на фоне волны, не оказали какого-либо заметного эффекта на ее характеристики.

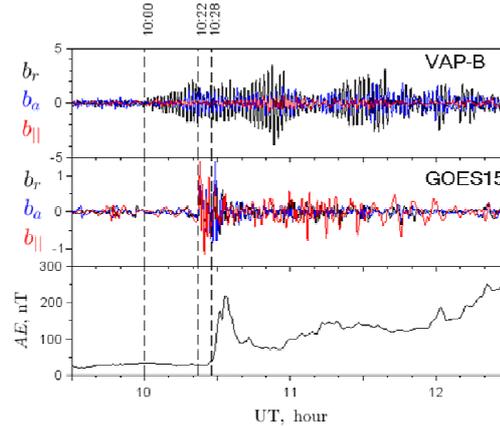


Рис. 2. Первое появление волны в измерениях магнитного поля спутника VAP-B, компрессионный импульс на ночной стороне по наблюдениям G15 и AE-индекс с 09:30 до 12:30 UT 25 февраля. Черная, синяя и красная кривые обозначают радиальную  $b_r$ , азимутальную  $b_a$  и продольную  $b_{||}$  компоненты магнитного поля, соответственно

Причем последняя суббуревая инжекция из этой последовательности произошла около 02:00 UT 26 февраля, когда уже никакие волны не наблюдались. С другой стороны, поздняя фаза восстановления магнитной бури связана с заполнением плазмосферы и восстановлением кольцевого тока — продолжительными процессами, ведущими к изменению параметров плазмы. Эти изменения хорошо коррелируют с поведением волны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным потоков заряженных частиц было определено, что волна находилась в баунс-дрейфовом резонансе с протонами  $100 \pm 20$  кэВ, распространялась на запад и имела  $m=-210$ , что подтверждается вычислениями из теории резонанса и из измерений с помощью эффекта конечного ларморовского радиуса [Rubtsov et al., 2021].

Рассмотренный уникальный случай помог понять роль суббуревых инжекций в генерации УНЧ-волн путем сравнения измерений до и после начала суббури. Удивительно, но мы не обнаружили изменений параметров волны, связанных с суббуревой инжекцией. В результате, мы пришли к выводу, что возбуждение волны и ее параметры зависели от восстановления магнитосферы после магнитной бури. Это заключение согласуется с предыдущими исследованиями, в которых волны наблюдались на фоне фазы восстановления магнитной бури, но при полном отсутствии суббурь (например, [Takahashi et al., 2018]).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Климущкин Д.Ю., Мэгер П.Н., Члепанов М.А., Костарев Д.В. Взаимодействие длиннопериодных УНЧ-волн и заряженных частиц в магнитосфере: теория и наблюдения (обзор). *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 35–69.
- Angelopoulos V. The THEMIS mission. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 141. P. 5–34.
- Dungey J.W. *Electrodynamics of the Outer Atmosphere*. University Park: The Pennsylvania State University, 1954. 52 p.
- Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Glassmeier K.H. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wave numbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 267–287.
- Mauk B.H., Fox N.J., Kanekal S.G., et al. Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 3–27.
- McPherron R.L. Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity. *Surveys in Geophysics*. 2005. Vol. 26. P. 545–592.
- Nosé M., Matsuoka A., Kumamoto A., et al. Longitudinal Structure of Oxygen Torus in the Inner Magnetosphere: Simultaneous Observations by Arase and Van Allen Probe A. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, no. 19. P. 10177–10184.
- Rubtsov A.V., Agapitov O.V., Mager P.N., et al. Drift Resonance of Compressional ULF Waves and Substorm-Injected Protons From Multipoint THEMIS Measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no. 11. P. 9406–9419.
- Rubtsov A.V., Mikhailova O.S., Mager P.N., et al. Multispacecraft Observation of the Presubstorm Long-Lasting Poloidal ULF Wave. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, no. 23. e2021GL096182.
- Southwood D.J., Dungey J.W., Etherington R.J. Bounce resonant interaction between pulsations and trapped particles. *Planet. Space Sci.* 1969. Vol. 17. P. 349–361.
- Takahashi K., Oimatsu S., Nosé M., et al. Van Allen Probes Observations of Second Harmonic Poloidal Standing Alfvén Waves. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 611–637.