

УДК 533.951.2

## ГЕНЕРАЦИЯ УНЧ-ВОЛНЫ ЭЛЕКТРОНАМИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗОНДА VAN ALLEN PROBE A

**О.С. Михайлова, Е.Е. Смотровая, П.Н. Магер**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
o\_mikhailova@iszf.irk.ru

## GENERATION OF AN ULF-WAVE BY ELECTRONS: VAN ALLEN PROBE A CASE STUDY

**O.S. Mikhailova, E.E. Smotrova, P.N. Mager**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
o\_mikhailova@iszf.irk.ru

**Аннотация.** В работе исследовано уникальное явление — генерация электронами в магнитосфере ультранизкочастотной (УНЧ) волны. Событие наблюдалось спутником Van Allen Probe A 27 октября 2012 г. на утренней стороне магнитосферы. Аппарат зарегистрировал УНЧ-волну с периодом 100 с и амплитудой 0.7 нТл. Одновременно с волной наблюдалась модуляция потоков электронов на частоте волны. Показано, что волна являлась основной гармоникой альфвеновской моды с азимутальным волновым числом  $m \sim 110\text{--}115$ , распространяющейся на восток. УНЧ-волна была сгенерирована в результате дрейфового резонанса из-за сильного пространственного градиента распределения электронов, которые были инжектированы в магнитосферу в ходе развития суббури.

**Ключевые слова:** дрейфовый резонанс, УНЧ-волны, электроны, пульсации Pc4, магнитосфера

**Abstract.** We examined a unique phenomenon – the generation of an ultra-low frequency (ULF) wave by electrons in the magnetosphere. The event was observed by the Van Allen Probes A satellite on October 27, 2012 on the morning side of the magnetosphere. The spacecraft registered a ULF wave with a period of 100 s and an amplitude of 0.7 nT. Simultaneously with the wave, modulations in electron fluxes were observed at the frequency of the wave. It is shown that the wave was the fundamental harmonic of the Alfvén wave with an azimuthal wave number  $m \sim 110\text{--}115$  propagating to the east. The ULF wave was generated as a result of drift resonance due to the strong spatial gradient of the distribution of electrons that were injected into the magnetosphere during the substorm development.

**Keywords:** drift resonance, ULF waves, electrons, Pc4 pulsations, magnetosphere

### ВВЕДЕНИЕ

УНЧ-волны регулярно наблюдаются в магнитосфере Земли и являются удобным средством ее диагностики, так как взаимодействуют с энергичными заряженными частицами магнитосферы. УНЧ-волны диапазонов Pc4-5 (40–600 с) регулярно наблюдаются на освещенной стороне магнитосферы [Anderson, 1992]. Если осцилляции в магнитном поле волны происходят преимущественно в радиальном направлении, волна называется полоидальной или полоидально-поляризованной альфвеновской волной; в случае азимутального направления волна называется тороидальной. Полоидальные волны активно взаимодействуют с заряженными энергичными частицами. Эти резонансные взаимодействия связаны с динамикой кольцевого тока [Southwood et al., 1969] и частиц радиационного пояса [Schulz and Lanzerotti, 1974]. Взаимодействие УНЧ-волн больших периодов с заряженными частицами происходит посредством дрейфового или баунс-дрейфового резонансов [Klimushkin et al., 2021].

Чаще всего наблюдается генерация УНЧ-волн протонами и взаимодействие с ними [Min et al., 2017; Takahashi et al., 2018a, 2018b]. Случаев взаимодействия волн с электронами существенно меньше [Ren et al., 2017, 2018]. Мы представляем исследование уникального события — резонансной генерации УНЧ-волны электронами.

### Наблюдаемые колебания и геомагнитные условия

С использованием данных, полученных в ходе миссии Van Allen Probes A, исследовано событие 27 октября 2012 г. Для исследования колебаний в магнитном поле мы использовали 4-секундные данные инструмента Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) [Kletzing et al., 2013] и 11-секундные данные инструмента Electric Fields and Waves (EFW) [Wygant et al., 2013] для изучения осцилляций в электрическом поле. Для исследования потоков электронов использовались 11-секундные данные инструмента Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) [Blake et al., 2013]. Наблюдаемое волновое событие зарегистрировано в утренней части магнитосферы на расстоянии около  $6R_E$  от Земли. Спутник зарегистрировал УНЧ-волну длительностью 45 мин с амплитудой 0.7 нТл (рис. 1). Частота наблюдаемой волны была практически постоянна и составила 10 мГц. Это волна соответствует диапазону Pc4. Волна имела смешанную поляризацию: полоидальная (радиальная)  $b_r$ - и тороидальная (азимутальная)  $b_a$ -компоненты слабо различаются по амплитуде. Продольная компрессионная компонента существенно слабее радиальной и азимутальной компонент.

УНЧ-волна наблюдалась на фоне восстановительной фазы суббури (индекс  $K_p=10$ , индекс  $Dst=-20$  нТл) за пределами плазмосферы. Событию пред-

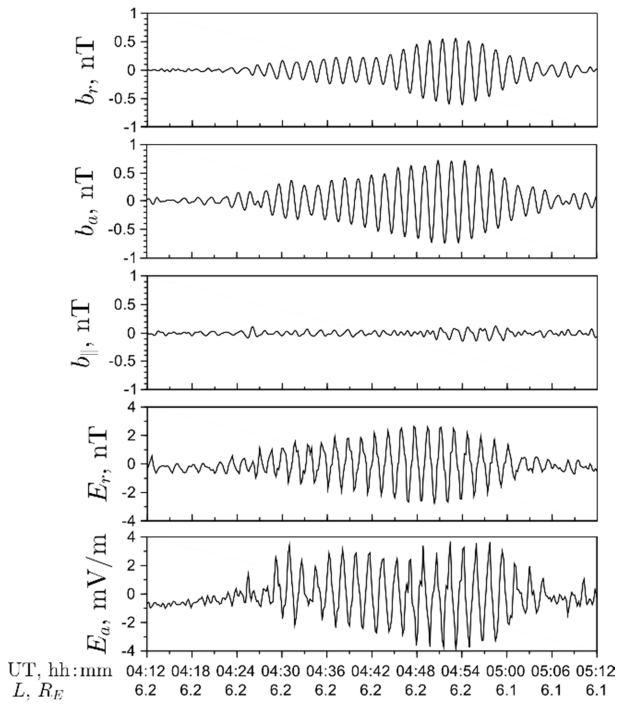


Рис. 1. Колебания в магнитном и электрическом полях: сверху вниз — радиальная, азимутальная и продольная компоненты магнитного поля, радиальная и азимутальная компоненты электрического поля

шествовал ряд суббурь. За ~70 мин до начала события зарегистрирована суббуря (время onset 3.23 UT), во время которой индекс  $AL$  достиг значения ~-150. Вероятно, эта суббуря стала источником энергичных электронов, ответственны[ за генерацию наблюдаемой геомагнитной пульсации Pc4.

### Колебания в потоках электронов

По данным инструмента MagEIS нам удалось зарегистрировать модулированные потоки заряженных электронов одновременно с волной. Мы нашли резонансные колебания, совпадающие по частоте с осцилляциями в магнитном поле и потоках электронов с энергией 38 кэВ (рис. 2).

Максимальная амплитуда колебаний фиксировалась у частиц с питч-углами  $90^\circ$ . Взаимодействие УНЧ-волны с такими частицами соответствует фундаментальной симметричной относительно экватора гармонике волны и дрейфовому резонансу [Southwood, 1976; Southwood, Kivelson, 1982]. Фундаментальную гармонику видно на рис. 3.

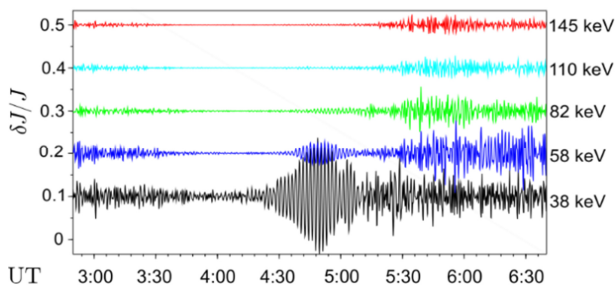


Рис. 2. Осцилляции в потоках электронов. Видны резонансные колебания с энергией 38 кэВ

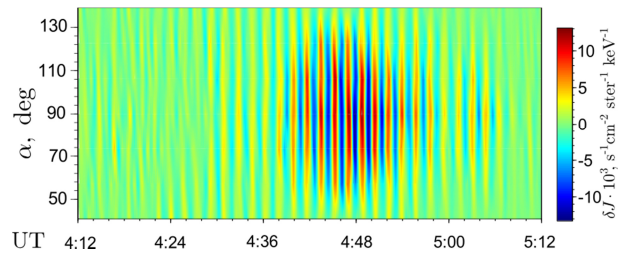


Рис. 3. Распределение частиц с энергией 38 кэВ по питч-углам

Условие дрейфового резонанса можно записать в виде

$$\omega - m\omega_d = 0, \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота волны,  $m$  — азимутальное волновое число,  $\omega_d$  — угловая частота магнитного дрейфа частиц, усредненная по баунс-периоду. Исходя из (1), мы вычислили  $m \sim 110 \div 115$ . Волна является азимутально-мелкомасштабной и движется на восток с ночи в день. Азимутальная длина волны составляет примерно 2200 км, т. е.  $\sim 0.3R_E$ .

### Неустойчивость

Для роста амплитуды волны, т. е. для передачи энергии от частиц волне, необходимо наличие неустойчивого распределения частиц по энергиям (инверсная функция распределения по энергиям) или по пространству (наличие сильного радиального градиента функции распределения) [Southwood et al., 1969]. Для развития неустойчивости необходимо выполнение условия

$$\hat{Q}F = \left[ \frac{\partial F}{\partial \epsilon} + \frac{m}{\omega} \frac{c}{qB_{eq}} \frac{\partial F}{L \partial L} \right]_{\epsilon_{res}} > 0. \quad (2)$$

Здесь  $F$  — функция распределения,  $\epsilon$  — энергия частиц,  $q$  — заряд частицы,  $c$  — скорость света,  $B_{eq}$  — магнитное поле на геомагнитном экваторе,  $L$  — параметр МакИлвейна, используемый в качестве радиальной координаты,  $\epsilon_{res}$  — резонансная энергия. Условие (2) должно выполняться либо при  $\partial F/\partial \epsilon > 0$ , либо при  $\partial F/\partial L < 0$ . В нашем случае удовлетворяется второе неравенство. Это означает, что волна должна генерироваться пространственной градиентной неустойчивостью. Условие  $\partial F/\partial L < 0$  выполняется с 4:00 до 4:50 UT (рис. 4 а, б). Волна имеет отрицательный пространственный градиент в двух областях: в 4:00–4:27 UT, когда спутник движется в направлении от Земли, и в 4:27–4:50 UT, когда спутник развернулся и двигался в обратном направлении.

Мы предполагаем, что волна могла быть сгенерирована в результате инъекции электронов в магнитосферу во время развития суббури. Используя данные потоков электронов, мы смогли локализовать onset суббури, которая сгенерировала пучок электронов. Мы определили, что onset произошел в 3.23 UT. Данное время соответствует времени начала суббури по данным индекса  $AL$ . Локализовав суббурю по MLT, мы обнаружили, что она произошла в полночь.

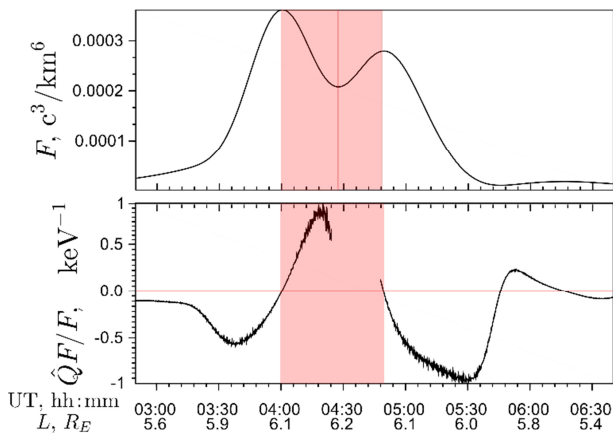


Рис. 4. Функция распределения электронов от времени и  $L$ . Розовый прямоугольник — область отрицательного радиального градиента 4:00–4:27 UT, когда спутник движется от Земли с UT=4:27 по 4:50, когда спутник движется к Земле. Красная линия на 4:27 UT показывает положение апогея (а). Условие неустойчивости — из уравнения (2). Коэффициент неустойчивости положительен в 4:00–4:50 UT, область вблизи апогея спутника  $L=6.2$  исключена из-за неопределенности радиального градиента (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось наблюдать и детально изучить уникальное явление резонансной генерации УНЧ-волны энергичными электронами в магнитосфере.

Мы наблюдали фундаментальную гармонику альфвеновской волны с периодом около 100 с. Отмечались почти равные по амплитуде осцилляции в радиальной и азимутальной компонентах магнитного и электрического полей, т. е. волна имела смешанную поляризацию. Одновременно с волной наблюдались резонансные осцилляции в нескольких потоках электронов при энергиях 38–82 кэВ. Было показано, что электроны взаимодействуют с волной посредством дрейфового резонанса. Установлено, что резонансная энергия электронов составляет ~38 кэВ. Из условия равенства дрейфовой скорости электронов и фазовой скорости волны в резонансе найдено азимутальное волновое число  $m \sim 100\text{--}115$ , что означает наблюдение азимутально-мелкомасштабной волны, бегущей на восток. Показано, что волна генерировалась градиентной неустойчивостью, вызванной сильным радиальным градиентом концентрации электронов с резонансной энергией, инжектированных в магнитосферу во время суббури.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-1275 10139.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anderson B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 1. Equatorial occurrence distributions. *J. Geophys. Res.* 1992. P. 3075–3088. DOI: [10.1029/91JA02706](https://doi.org/10.1029/91JA02706).
- Blake J.B., Carranza P.A., Claudepierre S.G., et al. The magnetic electron ion spectrometer (MagEIS) instruments aboard the radiation belt storm probes (RBSP) spacecraft. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 383–421. DOI: [10.1007/s11214-013-9991-8](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9991-8).
- Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Chelpanov M.A., Kostarev D.V. Interaction of the long-period ULF waves and charged particle in the magnetosphere: theory and observations (overview). *Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 33–66. DOI: [10.12737/stp-74202105](https://doi.org/10.12737/stp-74202105).
- Min K., Takahashi K., Ukhorskiy A.Y., et al. Second harmonic poloidal waves observed by Van Allen Probes in the dusk-midnight sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 3. P. 3013–3039. DOI: [10.1002/2016JA023770](https://doi.org/10.1002/2016JA023770).
- Ren J., Zong Q. G., Miyoshi Y., et al. A comparative study of ULF waves' role in the dynamics of charged particles in the plasmasphere: Van Allen Probes observation. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 5334–5343. DOI: [10.1029/2018JA025255](https://doi.org/10.1029/2018JA025255).
- Ren J., Zong Q.G., Zhou X.Z., et al. Phase relationship between ULF waves and drift-bounce resonant ions: A statistical study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 7087–7096. DOI: [10.1002/2016JA023848](https://doi.org/10.1002/2016JA023848).
- Schulz M., Lanzerotti L.J. Particle Diffusion in the Radiation Belts. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1974, 236 p.
- Southwood D.J. A general approach to low-frequency instability in the ring current plasma. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81. P. 3340–3348. DOI: [10.1029/JA081i019p03340](https://doi.org/10.1029/JA081i019p03340).
- Southwood D.J., Kivelson M.G. Charged particle behavior in low-frequency geomagnetic pulsations. 2. Graphical approach. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 1707–1710. DOI: [10.1029/JA087iA03p01707](https://doi.org/10.1029/JA087iA03p01707).
- Southwood D.J., Dungey J.W., Etherington R.J. Bounce resonant interactions between pulsations and trapped particles. *Planetary and Space Sci.* 1969. Vol. 17. P. 349–361. DOI: [10.1016/0032-0633\(69\)90068-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90068-3).
- Takahashi K., McEntire R.W., Lui A.T.Y., Potemra T.A. Ion flux oscillations associated with a radially polarised transverse Pc5 magnetic pulsation. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 3717–3731. DOI: [10.1029/JA095iA04p03717](https://doi.org/10.1029/JA095iA04p03717).
- Takahashi K., Claudepierre S.G., Rankin R., et al. Van Allen probes observation of a fundamental poloidal standing Alfvén wave event related to giant pulsations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018a. Vol. 123. P. 4574–4593. DOI: [10.1029/2017JA025139](https://doi.org/10.1029/2017JA025139).
- Takahashi K., Oimatsu S., Nosé M., et al. Van Allen probes observations of second harmonic poloidal standing Alfvén waves. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018b. Vol. 123. P. 611–637. DOI: [10.1002/2017JA024869](https://doi.org/10.1002/2017JA024869).
- Wygant J. R., Bonnell J. W., Goetz K., Ergun R. E., Mozer F. S., Bale S. D. et al. The electric field and waves instruments on the radiation belt storm probes mission. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 183–220. DOI: [10.1007/s11214-013-0013-7](https://doi.org/10.1007/s11214-013-0013-7).