

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.031

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ АВРОРАЛЬНОЙ ДУГИ НА СВОЙСТВА СВЯЗАННЫХ С НЕЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

В.В. Сафаргалеев<sup>1</sup>, Т.И. Сергиенко<sup>2</sup>, К. Хосокава<sup>3</sup>, В.Н. Митрофанов<sup>1</sup>,  
Я. Огава<sup>4</sup>, Ё. Миоши<sup>5</sup>, Ш. Ояма<sup>5,6,3</sup>, С. Курита<sup>7</sup>, Р. Фуджий<sup>8</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Шведский институт космической физики, Кируна, Швеция

<sup>3</sup>Университет электро-коммуникаций, Токио, Япония

<sup>4</sup>Национальный институт полярных исследований, Токио, Япония

<sup>5</sup>Институт околоземного космического пространства, Нагойский университет, Япония

<sup>6</sup>Университет Оулу, Финляндия

<sup>7</sup>Исследовательский институт экологии человека, Киотский университет, Япония

<sup>8</sup>Исследовательская организация информационных систем, Токио, Япония

E-mail: [Vladimir.safargaleev@pgia.ru](mailto:Vladimir.safargaleev@pgia.ru)

**Аннотация.** Проанализировано две ситуации в пульсирующих полярных сияниях, в которых ориентация пульсирующих квазидуг была принципиально разной – вдоль и поперек меридиана. В обоих случаях геомагнитные пульсации, ассоциированные с высокочастотными пульсациями светимости, были более выражены в магнитной компоненте, перпендикулярной к пульсирующей дуге, чем в компоненте вдоль дуги. Это позволяет связать геомагнитные пульсации данного частотного диапазона скорее с модуляцией ионосферного тока, текущего вдоль дуги, чем с приходом в ионосферу модулирующей волны. Результат может быть полезен при поиске причин высокочастотной модуляции потока высыпающихся электронов.

### Введение

Пульсирующие сияния (ПС) относятся к разновидности диффузного свечения и имеют форму нерегулярных пятен или более регулярных дугообразных структур с квазипериодическим включением-выключением их интенсивности. Пятна имеют неправильную форму и различную ориентацию. Пульсирующие дуги вытянуты преимущественно вдоль геомагнитной широты. Их длина составляет ~ 1000 км. Длина ПС в виде сегментов дуг - первые сотни километров, а их ориентация не обязательно привязана к геомагнитной широте. ПС появляются на фазе восстановления суббури. Период пульсаций лежит в диапазоне 2-20 с и может быть разным для разных структур. Характеристики ПС суммированы в обзорах [1, 2].

Текущее исследование фокусируется на сегментах дуг, которые характеризуется смесью двух различных периодичностей, сосуществующих иерархически. «Главные пульсации» представляют собой периодичность в диапазоне от нескольких до нескольких десятков секунд. «Внутренняя модуляция» проявляется как более быстрое мерцание светимости ( $3 \pm 1$  Гц), заключенное в единичный импульс включения главных пульсаций. Частота мерцания может меняться как во времени, так и в пространстве. Внутренняя модуляция проявляется более чем в 50% всех событий ПС.

Теория предсказывает важную роль активных ионосферных процессов в возникновении и/или изменении пульсирующих ПС [3]. Радарные измерения показали, что концентрация электронов и холловская проводимость изменяются в соответствии с оптическими пульсациями [4]. Это означает, что ПС может модулировать ионосферную токовую систему квазипериодическим образом. По данным спутника Swarm, к полюсу и экватору пульсирующих пятен обнаружены сильные нисходящие токи [5]. Восходящие токи наблюдаются во внутренней части пятен, что позволяет авторам предположить, что токи могут замыкаться через горизонтальные токи в ионосфере. Пульсирующие ионосферные токи могут вызывать магнитные пульсации в диапазоне периодов в несколько секунд. В работе [6] определили, что эти токи должны быть ориентированы в направлении север-юг. Отметим, что приведенные выше экспериментальные результаты относятся к пульсирующим пятнам (за исключением результата [6], полученного по данным фотометра, то есть без указания на формы ПС). Пульсирующие дуги имеют меньшие (поперечные) размеры, что затрудняет корректную ассоциацию спутниковых и радарных измерений со светящейся областью в ионосфере [7].

Считается, что электроны, ответственные за пульсирующие полярные сияния, высыпаются в ионосферу посредством пичч-углового рассеяния на волнах. Кандидатами на рассеяние являются «хоры» и электростатические электронные циклотронные волны. Главные пульсации ПС связывают с циклотронными волнами, а внутреннюю модуляцию – с хорами [8]. Последнее утверждение было подкреплено результатами исследования двух событий сопряжения спутника Agase с наземной оптической аппаратурой [9].

Таким образом, магнитные осцилляции на земной поверхности могут быть результатом как модуляции ионосферного тока высыпающимися частицами, так и проникновения (тем или иным способом) самих рассеивающих волн из магнитосферы сначала в ионосферу, а потом на земную поверхность. В данной работе исследуется отклик геомагнитного поля на пульсации светимости в диапазоне внутренней модуляции (частота 2-3 Гц). Цель исследования – прояснить, может ли предложенная нами методика дать ответ на вопрос, что является их источником падающая волна или модулированный высыпаниями ионосферный ток.

### Методика, аппаратура и данные

Суть методического подхода заключается в сравнении параметров геомагнитных пульсаций в диапазоне внутренней модуляции, регистрируемых индукционным магнетометром под пульсирующими квазидугами, ориентированными в одном случае вдоль, а в другом - поперек широты. Мы предполагаем, что при продольной ориентации авроральной структуры магнитные пульсации будут отчетливее проявляться в X-компоненте, а при NS-ориентации – в Y-компоненте. Последнее предположение основано на надежно установленной связи NS-структур типа омега-сияний и авроральных факелов с характерными вариациями в Y-компоненте геомагнитного поля [10]. Вариация в этой компоненте указывает наличие в структуре ионосферного тока, текущего вдоль меридиана. Если в пульсирующей NS структуре также присутствует меридиональный ток, то модуляция ионосферной проводимости высыпающимися частицами приведет к генерации пульсаций в Y-компоненте геомагнитного поля.

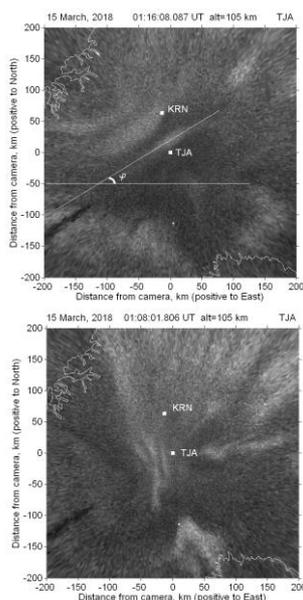


Рисунок 1. Ориентация пульсирующих дуг.

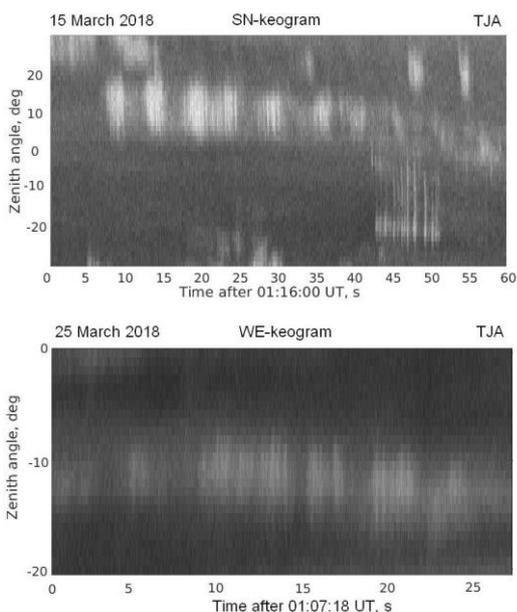


Рисунок 2. Главные пульсации и внутренняя модуляция.

Базовым инструментом исследования явилась камера полного обзора неба PSA EMCCD в пункте Tjautjas (TJA; 67.31 ° N, 20.73 ° E), Швеция, которая используется в рамках проекта PWING (например, [11]) и дает 100 изображений в секунду, что позволяет обнаруживать внутреннюю модуляцию в ПС. Регистрация вариаций геомагнитного поля с частотой опроса 160 Гц производилась в пункте Kiruna (KRN; 67.88°N, 20.42°E), расположенном неподалеку от камеры (см. Рис. 1).

Период наблюдения ПС относился к фазе восстановления суббури 15 марта 2018 г., так что пульсирующие сияния можно характеризовать как типичное явление. Были отобраны два интервала, когда интересующие нас структуры находились в области зенита TJA (Рис. 1). Во время первого интервала серия пульсирующих квазидуг была ориентирована примерно вдоль меридиана (Рис. 1, нижняя панель), то есть в направлении X-компоненты геомагнитного поля. Отметим, что такая ситуация реализуется редко. Во время второго интервала система квазидуг была ориентирована примерно вдоль геомагнитной широты (Рис. 1, верхняя

панель). Угол  $\varphi$ , на который дуга отклонена от географической параллели, использовался для пересчета компонент магнитного поля в систему координат с осью X, направленной перпендикулярно дуге.

## Результаты

Главные пульсации и внутренняя модуляция отчетливо видны на кеограммах и на вариациях светимости в квазидугах, представленных на Рис. 2 и 3 (соответственно). Кеограмма на нижней панели Рис. 2 построена вдоль широты, проходящей через зенит TJA, перпендикулярно серии NS структур. Кеограмма на верхней панели построена традиционным способом и отражает динамику структур вдоль меридиана. Положительным значениям зенитного угла на верхней кеограмме соответствует направление на север, а на нижней – на восток.

Рисунок 3 показывает вариации среднего значения светимости дуг. Видно, что короткоживущие всплески светимости имеют нерегулярный характер. Для наглядности, на верхней панели у вершин пиков приводится время достижения пикового значения в сотых долях секунды («координата» X), так что разность этих значений есть время между пиками. Обратная величина этого времени указывает на частоту, которую можно ожидать при спектральном анализе геомагнитных вариаций.

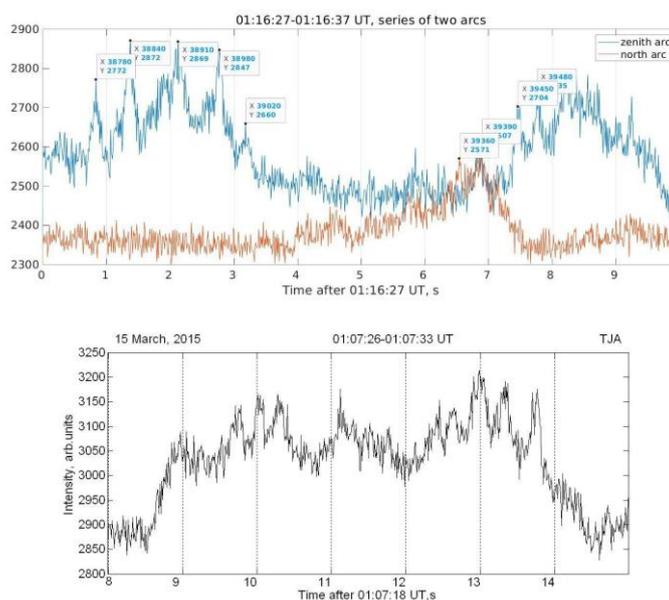


Рисунок 3. Вариации свечения в дуге.

На Рисунке 4 представлен спектр вариаций в компонентах геомагнитного поля. На легенде индекс 1 означает, что для этой ситуации был произведен пересчет компонент в систему координат дуги, которая повернута относительно традиционной XY на угол  $\varphi$  (см. Рис. 1). Таким образом, компонента X1 направлена перпендикулярно дуге, а Y1 – вдоль дуги. Интервал частот, в котором ожидаются пульсации, выделен серым. Сравнение спектров на правой левой панелях указывает на то, что магнитные пульсации, которые по частоте можно ассоциировать с оптическими пульсациями диапазона внутренней модуляции, сильнее проявляются в компоненте X1 на левой панели Рис. 4 и в Y-компоненте на правой панели. Учитывая ориентацию дуг, приходим к выводу, что в обоих случаях внутренняя модуляция сияний проявилась в геомагнитной компоненте, направленной поперек дуги и могла быть обусловлена модуляцией тока, текущего вдоль дуги.

## Заключение

Полученный результат согласуется с предположением о потенциальной возможности модуляции ионосферных токов модулированным потоком высыпавшихся электронов [4]. Авторы пришли к такому выводу для пульсирующих сияний с периодом 8–17 с (главные пульсации). Наш результат относится к пульсациям типа внутренней модуляции. Он может указывать на то, что магнитные пульсации на частоте внутренней (оптической) модуляции могут быть обусловлены, скорее, модуляцией ионосферного тока высыпавшимися частицами, чем приходом в ионосферу модулирующей волны.

В рамках дискуссии мы также хотим отметить поведение двух дуг, находящихся вблизи друг от друга, вариации светимости в которых представлены на Рис. 3 (верхняя панель). Ослабление (выключение) зенитной дуги, в которой присутствует внутренняя модуляция, кажется связанным с усилением

(включением) полюсной дуги без внутренней модуляции. Затем зенитная дуга вновь включается, а полюсная ослабевает. Такое противофазное поведение двух обычных дуг было описано ранее в работе [12] и объяснялось, в частности, изменением ионосферного электрического поля разгорающейся дугой. В нашем случае, можно увидеть, что при повторном включении зенитной дуги частота внутренней модуляции изменилась. Нестабильный характер пульсаций светимости отмечался многими авторами, но пока не нашел объяснения. Потенциальная возможность дуги влиять на динамику соседней, возможно, будет полезной при поиске причин нестабильности частоты внутренней модуляции.

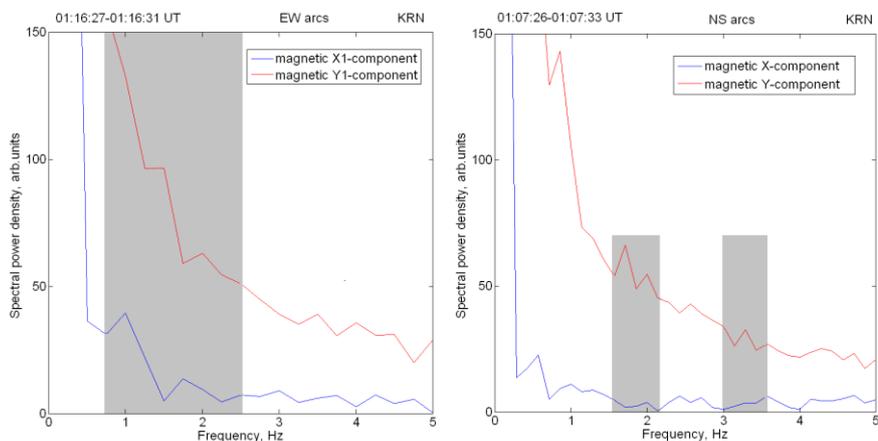


Рисунок 4. Спектр вариаций компонент геомагнитного поля.

**Благодарности.** Работа российских авторов поддержана грантом РФФИ 19-52-50025 ЯФ\_a. This work has been supported by JSPS KAKENHI JP 15H05747 and 16H06286. The operation of the EMCCD camera at Tjautjas has been supported by Swedish Institute of Space Physics.

### Список литературы

1. Lessard M.R. in *A review of Pulsating Aurora. Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth and Other Planets*. Geophys. Monogr. Ser., 197, 55, doi: 10.1029/2011GM001187, 2013.
2. Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y., et al.: Diffuse and Pulsating Aurora. *Space Sci. Rev.*, 216 (4), doi: 10.1007/s11214-019-0629-3, 2020.
3. Stenbaek-Nielsen H.S.: Pulsating aurora: the importance of the ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 7, 728, doi: 10.1029/GL007i005p00353, 1980.
4. Hosokawa K., Ogawa Y., Kadokura A., et al.: Modulation of ionospheric conductance and electric field associated with pulsating aurora. *J. Geophys. Res.*, 115, A03201, <http://doi.org/10.1029/2009JA014683>, 2010.
5. Gillies D.M., Knudsen D., Spanswick E.: Swarm observations of field-aligned currents associated with pulsating auroral patches. *J. Geophys. Res.*, 120, 9484, doi: 10.1002/2015JA021416, 2015.
6. Arnoldy R.L., Dragoon K., Cahill L.J.: Detailed correlations of magnetic field and riometer observations at L= 4.2 with pulsating aurora. *J. Geophys. Res.*, 87, 10449, doi: 10.1029/ja087ia12p10449, 1982.
7. Safargaleev V., Safargaleeva N.: On the accuracy of the conjugation of high-orbit satellites with small-scale regions in the ionosphere. *Cosmic Research*, 56, 115, doi: 10.1134/S0010952518020089, 2018.
8. Fukizawa M., Sakanoi T., Miyoshi Y., et al.: Electrostatic electron cyclotron harmonic waves as a candidate to cause pulsating aurora. *Geophys Res. Lett.*, 45, 12661, doi: 10.1029/2018GL080145, 2018.
9. Hosokawa K., Miyoshi Y., Ozaki M., et al.: Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves. *Sci Rep.*, 10, 3380, doi: 10.1038/s41598-020-59642-8, 2020.
10. André D., Baumjohann W.: Joint two-dimensional observations of ground magnetic and ionospheric electric fields associated with auroral currents. 5. Current system associated with eastward drifting omega bands, *J. Geophys. Res.*, 87, 10449, doi: 10.1029/ja087ia12p10449, 1982.
11. Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y., et al.: Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network. *Earth Planets Space*, 69, 160, doi: 10.1186/s40623-017-0745-9, 2017.
12. Safargaleev V., Lyatsky W., Tagirov V.: Luminosity variations in several parallel auroral arcs before auroral breakup, *Ann. Geophysicae*, 15, 959, doi: 10.1007/s00585-997-0959-4, 1997.