

## О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ДУГ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ МГД КОЛЕБАНИЯМИ Pc5 ДИАПАЗОНА

В.Б. Белаховский<sup>1</sup>, В.А. Пилипенко<sup>2</sup>, Д. Лоренцен<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Университетский Центр на Шницбергене, Норвегия

**Аннотация.** В работе исследована возможность генерации дуг полярных сияний тороидальными МГД колебаниями, возбуждаемыми в магнитосфере за счет резонанса силовых линий. Данные МГД колебания проявляются как геомагнитные Pc5 пульсации, наблюдаемые на земной поверхности по данным магнитометров сети CARISMA и в магнитосфере по данным спутника GOES-8. Геомагнитные Pc5 пульсации сопровождаются одновременными Pc5 пульсациями в интенсивности полярных сияний в эмиссиях 557.7, 630.0, 470.9 нм. Для авроральных Pc5 пульсаций наблюдается распространение к полюсу аналогично геомагнитным Pc5 пульсациям. При появлении авроральных Pc5 пульсаций отношение интенсивностей эмиссий 557.7/630.0 заметно увеличивается, что свидетельствует о том, что авроральные пульсации являются следствием периодического ускорения авроральных электронов полем альвеновской волны. Предположительно, механизм модуляции авроральных эмиссий связан с взаимодействием альвеновских волн с областью продольного падения потенциала над авроральной ионосферой.

### 1. Введение

Геомагнитные Pc5 пульсации (периоды порядка нескольких минут) являются одним из наиболее мощных проявлений МГД волновой активности в околоземном космическом пространстве. Pc5 пульсации способны заметно модулировать как потоки захваченных энергичных электронов и протонов разных энергий в магнитосфере, так и ионосферную плазму [Pilibenko et al., 2014]. Взаимодействие МГД волн с магнитосферными частицами может приводить к пульсациям форм и интенсивностей различных типов полярных сияний. Модуляция авроральной светимости разными типами низкочастотных геомагнитных пульсаций наблюдалась в различных секторах местного времени, что может говорить о разных механизмах модуляции потоков авроральных электронов (~1 кэВ) [Баишев и др., 2012; Воробьев и др., 2008].

Кроме того, Pc5 волны могут не только пассивно модулировать магнитосферные частицы, но и приводить к их ускорению. Однако конкретный механизм ускорения пока не установлен, несмотря на большое число предложенных теоретических моделей. Предположительно, периодическое ускорение и высыпание электронов вызывается продольным электрическим полем  $E_{\parallel}$  волны. Ускоренные полем волны электроны могут получать энергию, достаточную для уярчения полярных сияний в целом, т.е. приводить к образованию так называемой "альвеновской авроры" [Keiling et al., 2002]. Провести различие между альвеновской авророй и полярными сияниями, вызванными стационарным ускорением электронов в области с продольным падением потенциала, удастся только с помощью отличий в спектре авроральных электронов, регистрируемых на низкоорбитальных спутниках.

В данной работе проанализировано событие 1 января 2000 года, которое дает возможность получить важную информацию о возможности генерации авроральных дуг в МГД колебаниями Pc5 диапазона.

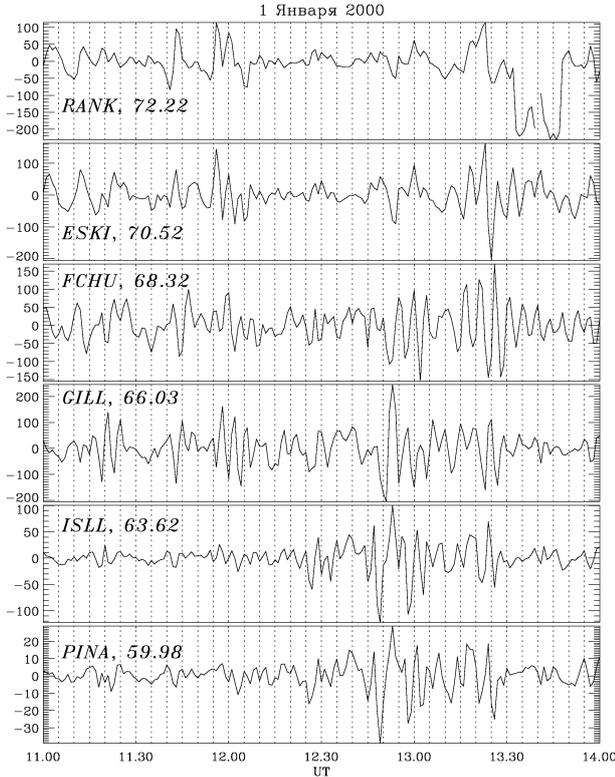
### 2. Данные наземных и спутниковых наблюдений

Для наблюдения за полярными сияниями использованы 1-мин данные меридиональных сканирующих фотометров GILL, PINA, FSMI сети NORSTAR (Канада). Фотометры сети NORSTAR регистрируют полярные сияния в эмиссиях 557.7, 630.0, 471.0, 486.0 нм и выдают данные для 17 углов. Используются данные вертикальных риометров сети NORSTAR вдоль меридиана ~330°. Для наблюдения за вариациями геомагнитного поля использованы данные наземных станций сетей CARISMA. Наземные наблюдения дополнены данными 3-компонентных магнитометров геостационарного спутника GOES-8 (MLT=UT-5). В работе рассмотрено событие 1 Января 2000 г.

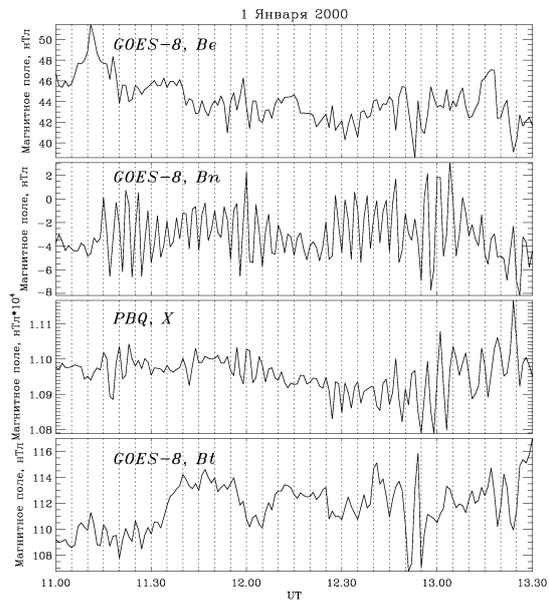
### 3. Событие 1 января 2000 года

**3.1. Геофизическая обстановка и параметры межпланетной среды.** Анализируемые геомагнитные Pc5 пульсации наблюдались в интервале 11.00-16.00 UT во время суббури (AE до ~1100 нТл) при отсутствии геомагнитной бури (SYM-H ~ -20-40 нТл). Скорость солнечного ветра была достаточно высока (~700-750 км/с) при невысокой плотности (~2-4 см<sup>-3</sup>) солнечного ветра, при этом заметных скачков в плотности солнечного ветра не наблюдалось.

**3.2. Геомагнитные Pc5 пульсации на Земле и в магнитосфере.** Интенсивные Pc5 пульсации, как о ( $\Delta X=300$  нТл), наблюдались в утреннем секторе ( $\sim 05.00-08.00$  MLT) в интервале времени 11.00-16.00 UT на меридиональном профиле магнитных станций сети CARISMA (рис. 1). Значение азимутального волнового числа  $m=4$  соответствует крупномасштабной азимутальной структуре геомагнитных колебаний, т.е. тороидальной альвеновской моде, распространяющей в антисолнечном направлении. В целом наблюдается хорошее согласие между Pc5 пульсациями, видимыми на Земле и в магнитосфере. Поляризационная структура колебаний магнитного поля, зарегистрированных на геостационарном спутнике GOES-8, соответствует тороидальным альвеновским колебаниям: азимутальная  $B_n$  компонента ( $\sim 10$  нТл) преобладает над радиальной  $B_e \sim 1$  нТл (рис. 2).



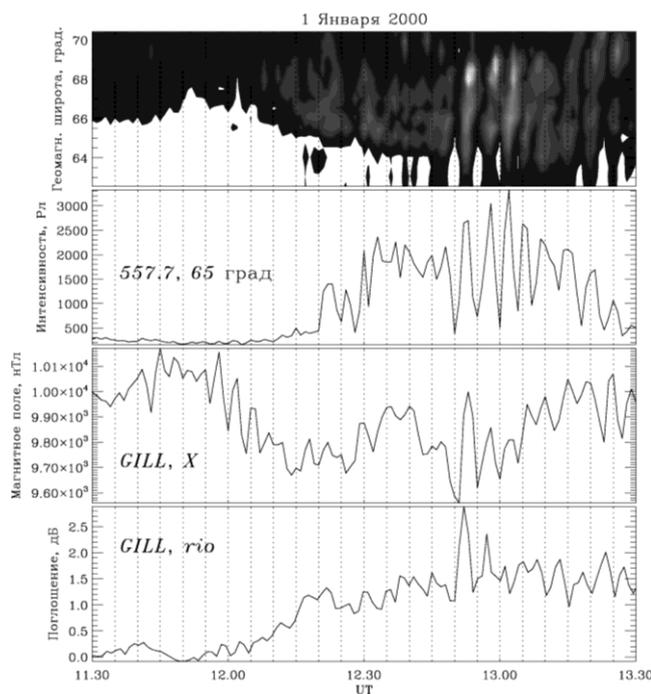
**Рисунок 1.** Вариации X-компоненты геомагнитного поля по данным станций PINA-ISLL-GILL-FCHU-ESKI-RANK вдоль долготы  $330^\circ$ , 11.00-14.00 UT с удаленным трендом. В скобках указана геомагнитная широта станций.



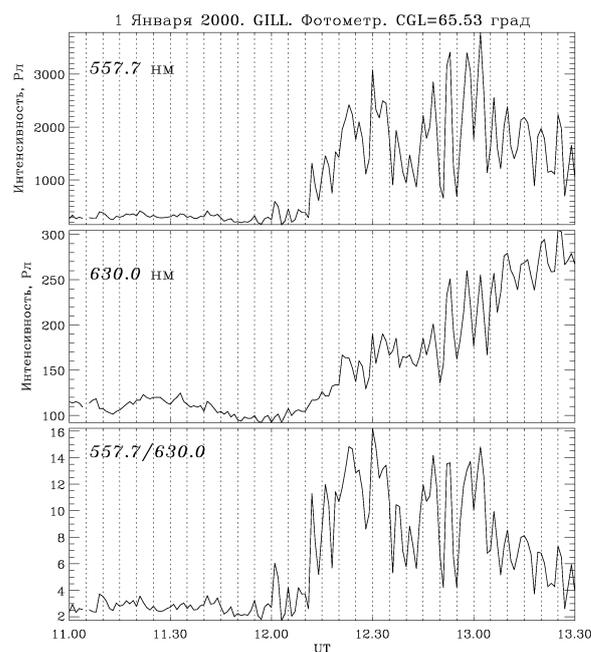
**Рисунок 2.** Вариации магнитосферного магнитного поля по данным геостационарного спутника GOES-8 ( $B_e$  и  $B_n$  компоненты, модуль поля  $B_t$ ) и X-компонента геомагнитного поля на магнитосопряженной станции PBQ.

**3.3. Pc5 пульсации в интенсивности полярных сияний.** Геомагнитные Pc5 пульсации сопровождаются одновременными Pc5 пульсациями в эмиссиях кислорода 557.7 нм и 630.0 нм, азота 471.0 нм и риометрическом поглощении (Рис. 3). С точки зрения морфологии авроральные Pc5 пульсации представляют собой дискретные дуги полярных сияний. Для авроральных Pc5 пульсаций, как в 557.7 нм, так и 630.0 нм, видна характерная структура (Рис. 3), где каждый яркостный элемент наклонен вправо, что соответствует приходу частиц, вызывающих уярчение светимости, сначала на более низкие широты, а затем на более высокие широты. Кажущееся распространение с низких широт к более высоким широтам является отражением фазовой структуры продольных токов, переносимых волной, в области альвеновского резонанса.

Соотношение между интенсивностями различных эмиссий дает возможность оценить энергию высыпавшихся электронов. Возбуждение атомов кислорода в эмиссии 557.7 нм возникает при высыпании в ионосферу более энергичных электронов, чем при возбуждении атомов кислорода в эмиссии 630.0 нм. Для фонового свечения  $I_{557.7}/I_{630.0} \sim 2-3$  (Рис. 4). При активизации авроральной активности, сопровождаемой пульсациями свечения, хотя интенсивности обеих авроральных эмиссий нарастают, но отношение их интенсивностей  $I_{557.7}/I_{630.0}$  резко возрастает до 12-16 (Рис. 4). Следовательно, геомагнитные Pc5 пульсации вызывают не просто периодическую модуляцию высыпавшихся частиц, но и приводят к дополнительному периодическому ускорению электронов. При этом повышается не только отношение общих уровней светимости в разных эмиссиях, но и их отношение также пульсирует.



**Рисунок 3.** Кеограмма интенсивности сияний по данным фотометра на станции GILL в эмиссии 557.7 нм; вариации интенсивности сияний на  $\Phi=65^\circ$ ; вариации X-компоненты геомагнитного поля и риометрического поглощения на станции GILL в интервале 11.30-13.30 UT.



**Рисунок 4.** Интенсивность полярных сияний в эмиссиях 557.7 нм и 630.0 нм на станции GILL, отношение интенсивностей 557.7/630.00 для интервала 11.30-13.30 UT.

#### 4. Модуляция области ускорения авроральных электронов альвеновской волной

Предположительно, периодическое ускорение и высыпание авроральных электронов вызывается продольным электрическим полем  $E_{\parallel}$  волны. Такое поле может возникать в альвеновской волне за счет мелкомасштабных кинетических или дисперсионных эффектов [Stasiewicz et al., 2000], однако волны столь малых масштабов полностью экранировались бы ионосферой от наземных магнитометров. Кинетические и нелинейные эффекты, приводящие к появлению  $E_{\parallel}$  и последующему к ускорению надтепловых электронов вдоль силовых линий, могут развиваться в области локализованных продольных токов в области альвеновского резонанса [Samson, 2003]. Формально, этот механизм никак не связан с авроральным овалом и может работать в любой области магнитосферы, где частота альвеновских колебаний силовой линии совпадает с частотой внешнего источника.

Для наблюдаемого поперечного масштаба области авроральной светимости  $\sim 30$  км, кинетические поправки (обусловленные конечным ларморовским радиусом или инерционной электронной длиной) оказываются слишком малыми, чтобы обеспечить появление в альвеновской волне  $E_{\parallel}$  заметной величины. Появление  $E_{\parallel}$  может быть связано с характерной особенностью аврорального овала – наличием области аврорального ускорения (*Auroral Acceleration Region*), в которой на высотах  $\sim 1-2$  Re образуется падение электрического потенциала, обусловленное пробочным сопротивлением (*mirror resistance*) вдоль силовой линии. Это нерезистивное падение потенциала вдоль силовых линий позволяет поддерживать ток, вытекающий из ионосферы, несмотря на малые конусные углы на авроральных широтах. Этот ток  $j_{\parallel}$  и падение потенциала  $\Delta\Phi$  связаны нелокальным соотношением Ома (соотношение Knight)  $\Delta\Phi = Q j_{\parallel}$ , где  $Q$  – пробочное сопротивление силовой трубки [Vogt, 2002]. Типичные значения продольного пробочного сопротивления  $Q=10^7-10^9$  Ом·м<sup>2</sup>, для которых падение потенциала  $\Delta\Phi \sim 0.01-10$  кэВ необходимо для поддержания авроральных токов  $j_{\parallel} \sim 10^{-6}-10^{-5}$  А/м<sup>2</sup>. О существовании AAR, в частности, свидетельствует соотношение  $W_t \sim W_0^2$  между средней энергией высыпавшихся электронов  $W_0$  (измеренное по отношению авроральных эмиссий) и полной энергией переносимой авроральными электронами  $W_t$  [Ono and Morishima, 1994]. Такое "квази-омическое" соотношение характерно для электронов, ускоренных в AAR.

Взаимодействие альвеновской волны с AAR приводит к появлению пульсирующего продольного электрического поля, вызывающего дополнительное ускорение авроральных электронов [Fedorov et al., 2004]. Магнитосферные альвеновские волны, проникающие внутрь AAR, вызывают периодическую

модуляцию падения потенциала. В рамках приближения тонкого AAR амплитуда этих осцилляций, нормированная на магнитное поле  $B$  падающей на AAR альвеновской волны, выражается как:

$$\frac{\Delta\Phi}{B} = K_{\Phi} T(k_{\perp} \lambda_A, \omega), \quad (1)$$

где коэффициент  $K_{\Phi} = \mu^{-1} (Q/\Sigma_A)^{1/2} = \lambda_A V_A$ ,  $\Sigma_A = (\mu V_A)^{-1}$  – альвеновская волновая проводимость,  $\lambda_A = \sqrt{Q\Sigma_A}$  – альвеновский резистивный масштаб. Это соотношение показывает, что модуляция падения потенциала альвеновской волной сильно зависит от поперечного масштаба волны (эта зависимость содержится в функции  $T(k_{\perp} \lambda_A)$ ). Для низкочастотных возмущений и освещенной ионосферы ( $\Sigma_P \gg \Sigma_A$ ) функция  $T(k_{\perp} \lambda_A)$  достигает максимального значения для поперечных масштабов  $k_{\perp} \lambda_A \sim 1$ . Таким образом, экстремальные значения  $\Delta\Phi/B = K_{\Phi}$ . Масштаб  $\lambda_A$  при типичных  $Q$  для  $\Sigma_A=1 \text{ Ом}^{-1}$  ( $V_A=800 \text{ км/с}$ ) может варьироваться в пределах  $3.2 \times (1-10) \text{ км}$  (т.е. 3-30 км). Дополнительная энергия  $\sim e\Delta\Phi$ , передаваемая авроральным электронам полем альвеновской волны с амплитудой  $B=40 \text{ нТл}$ , при оптимальных поперечных масштабах ( $T_{\Phi}=1$ ), достигает  $\sim 1-10 \text{ кэВ}$ . Таким образом, дополнительное модулированное ускорение в AAR достаточно, чтобы вызвать уярчение авроральной светимости, которое должно проявиться при фотометрических наблюдениях, но недостаточно, чтобы вызвать ускорение и высыпание энергичных электронов, ответственных за изменения риометрического поглощения космических радиосумов. При этом описываемый механизм ускорения электронов может работать только в авроральном овале, где образуется AAR.

## 5. Вывод

Авроральные дуги, наблюдаемые в эмиссиях 557.7, 630.0, 471.0 нм, являются результатом не только модуляции потоков электронов тороидальными МГД колебаниями Pc5 диапазона, но и периодического ускорения электронов в области над авроральным овалом. Авроральные пульсации отражают резонансную структуру тороидальных геомагнитных Pc5 пульсаций (фазовое распространение с низких широт к более высоким широтам). Предполагается, что взаимодействие альвеновской волны с областью падения потенциала над авроральным овалом (AAR) приводит к появлению пульсирующего продольного электрического поля. Это продольное поле вызывает дополнительное ускорение авроральных электронов, способное вызывать пульсации авроральной светимости в эмиссиях 630.0 нм и 557.7 нм.

**Благодарности.** Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ мол\_а № 16-35-00095 (БВ), Программы Президиума РАН № 9 (ПВ) и гранта №246725 от Исследовательского Совета Норвегии (ЛД). Выражаем благодарность за предоставленные данные проектов NORSTAR, CARISMA, спутника GOES сотрудникам соответствующих центров.

## Список литературы

- Баишев Д.Г., Баркова Е.С., Юмото К., Оптические наблюдения крупномасштабных волн диффузионного свечения в 23 цикле солнечной активности // Геомагнетизм и Аэронавигация. Т. 52. №2. С. 211–218. 2012.
- Воробьев В.Г., В.Б. Белаховский, О.И. Ягодкина, В.К. Ролдугин, М.Р. Хаирстон, Особенности полярных сияний в утреннем секторе во время SC // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 48. №2. С. 162-172. 2008.
- Fedorov E., V. Pilipenko, M.J. Engebretson, T.J. Rosenberg. Alfvén wave modulation of the auroral acceleration region // Earth, Planets, and Space. V. 56. P. 649-661. 2004.
- Keiling, A., J.R. Wygant, C. Cattell, W. Peria, G. Parks, M. Temerin, F.S. Mozer, C.T. Russell, C.A. Kletzing, Correlation of Alfvén wave Poynting flux in the plasma sheet at 4-7 Re with ionospheric electron energy flux // J. Geophys. Res. V. 107. P. 1132. 2002.
- Ono T., Morishima K., Energy parameters of precipitating auroral electrons obtained by using photometric observations // Geophys. Res. Lett. V. 21. №4. P. 261-264. 1994.
- Pilipenko V., Belakhovsky V., Kozlovsky A., Fedorov E., Kauristie K. ULF Wave modulation of the ionospheric parameters: Radar and magnetometer observations // J. Atmosp. Solar-Terr. Phys. V. 108. P. 68-76. 2014.
- Samson J.C., R. Rankin, V.T. Tikhonchuk, Optical signatures of auroral arcs produced by field line resonances: comparison with satellite observations and modeling // Ann. Geophys. V. 21. P. 933–945. 2003.
- Stasiewicz K., P. Bellan, C. Chaston, C. Kletzing, R. Lysak, J. Maggs, O. Pokhotelov, C. Seyler, P. Shukla, L. Stenflo, A. Streltsov, J-E. Wahlund, Small scale Alfvénic structure in the aurora // Space Sci. Rev. V. 93. P. 423-533. 2000.
- Vogt J. Alfvén wave coupling in the auroral current circuit // Surveys of Geophysics. V. 23. P. 335-377. 2002.