

УДК 550.338.1

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ШИРОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ $Pc1$ И ПОЛОЖЕНИЯ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ПЯТЕН ПРОТОННОГО СИЯНИЯ

© 2012 г. Т. А. Яхнина, А. Г. Яхнин

ФГБУ науки Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты (Мурманская обл.)

e-mail: yahnin@pgia.ru

Поступила в редакцию 01.02.2011 г.

После доработки 06.04.2011 г.

Широтное положение субавроральных пятен протонного сияния (особого типа протонных сияний, наблюдавшихся со спутника IMAGE) сопоставлено с распределением интенсивности пульсаций  $Pc1$ , определенным по данным меридиональной сети индукционных магнитометров, расположенных в Финляндии. Показано, что максимум интенсивности  $Pc1$  всегда наблюдается на той станции, которая находится ближе к проекции пятна протонного сияния. В событии, когда наблюдалось одновременно два пятна протонного сияния на разных широтах, регистрировались две полосы  $Pc1$ . При этом максимум в распределении интенсивности  $Pc1$  на более низких частотах был связан с пятном протонного сияния на большей широте, и наоборот. Такая пространственная корреляция пульсаций  $Pc1$  и пятен протонного свечения вместе с ранее установленной временной корреляцией этих явлений доказывают, что субавроральные пятна протонного сияния являются отображением на уровне ионосферы области циклотронной неустойчивости ионов в экваториальной магнитосфере.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны в диапазоне от десятых долей до нескольких герц генерируются в экваториальной плоскости магнитосферы в результате развития циклотронной неустойчивости ионов (протонов) кольцевого тока. Предполагается, что ЭМИЦ волны, распространяясь в магнитосфере вдоль магнитного поля в волноводе, образованном градиентом концентрации холодной плазмы (на плазмопаузе или в оторвавшихся от плазмосферы трубках с холодной плазмой), могут достичь ионосферы и вызвать возмущение, которое регистрируется наземными магнитометрами как геомагнитные пульсации  $Pc1$  (например, обзор [Kangas et al., 1998]).

Ионно-циклотронное взаимодействие предполагает как генерацию ЭМИЦ волн, так и рассеяние протонов кольцевого тока по питч-углам (например, [Cornwall et al., 1970]), которое приводит к заполнению конуса потерь [Erlandson and Ukhorsky, 2001; Yahnin et al., 2002; Yahnin and Yahnina, 2007] и, соответственно, высыпанию протонов. В работах [Yahnina et al., 2000; Yahnina et al., 2003; Яхнина и др., 2002] по данным низкоорбитальных спутников к экватору от границы изоtropии потоков энергичных ( $E > 30$  кэВ) протонов были обнаружены локализованные высыпания энергичных протонов, которые оказались статистически связаны с генерацией геомагнитных пульсаций  $Pc1$ . Широтный размер таких вы-

сыпаний составляет около одного градуса, что согласуется с широтной локализацией пакетов ЭМИЦ волн при наблюдениях на низкоорбитальных спутниках [Iijima and Hayashi, 1989; Engbretson et al., 2008]. Наилучшая корреляция наблюдалась, когда локализованные высыпания протонов наблюдались вблизи (в пределах двух часов MLT) меридиана наземной станции, на которой регистрировались  $Pc1$ . Это позволило предположить, что локализованные высыпания энергичных протонов являются ионосферной проекцией области развития ионно-циклотронной неустойчивости в экваториальной магнитосфере [Yahnin and Yahnina, 2007].

Высыпания энергичных протонов могут вызывать достаточно интенсивные протонные сияния – излучение возбужденных атомов водорода, образовавшихся в результате обмена зарядом между высыпающимися протонами и атмосферными молекулами. В последние годы такие сияния интенсивно изучались по данным высокоапогейного спутника IMAGE. Одним из типов протонных сияний, вызываемых локализованными протонными высыпаниями, являются пятна (области с размерами менее 300 км в диаметре) протонного свечения в субавроральной области [Frey et al., 2004], морфология которых сходна с морфологией  $Pc1$ . В работах [Yahnin et al., 2007; Яхнин и др., 2008] на нескольких примерах показано, что в тех случаях, когда проекция пятна протонного сияния находилась вблизи меридиа-

Координаты станций сети индукционных магнитометров в Финляндии

Название станции	Аббревиатура	Географические координаты (град)		Исправленные геомагнитные координаты (град)	
		Широта	Долгота	Широта	Долгота
Kilpisjarvi	KIL	69.02 N	20.86 E	65.9	104.2
Ivalo	IVA	68.55 N	27.28 E	65.1	108.9
Sodankyla	SOD	67.42 N	26.39 E	64.0	107.4
Rovaniemi	ROV	66.78 N	25.94 E	63.6	106.6
Oulu	OUL	65.08 N	25.90 E	61.7	105.6
Nurmijarvi	NUR	60.51 N	24.65 E	56.9	102.4

на станции, регистрирующей  $Pc1$ , наблюдалось хорошее соответствие моментов появления (исчезновения) пятна и начала (конца) регистрации  $Pc1$ . С увеличением долготного расстояния между проекцией пятна протонного сияния и наземной станцией это соответствие пропадало. Был сделан вывод о том, что пятно протонного сияния является двумерным отображением области циклотронного взаимодействия на ионосферном “экране”. Заметим, однако, что в цитируемых выше работах рассматривались лишь временные корреляции  $Pc1$  и протонных сияний и, отчасти, их зависимость от расстояния по долготе, поскольку для регистрации геомагнитных пульсаций использовалась лишь одна наземная станция (Ловозеро или Соданкюля). Проводить детальные пространственные сопоставления можно лишь с использованием сети разнесенных магнитометров.

Область падения на ионосферу локализованного пакета ЭМИЦ волн является областью источника волнового возмущения, которое распространяется в ионосферном МГД волноводе и регистрируется наземными магнитометрами как геомагнитные пульсации  $Pc1$ . Распространяющийся в ионосферном волноводе сигнал испытывает затухание, поэтому в области ионосферного источника должен наблюдаться максимум амплитуды  $Pc1$ . Таким образом, наземные наблюдения на сети станций позволяют локализовать источник пульсаций  $Pc1$ . Действительно, как показано в работах [Виноградова и Харченко, 1974; Varansky et al., 1981, Hayashi et al., 1981] амплитудное распределение  $Pc1$  на земной поверхности неоднородно и наблюдается выраженный максимум амплитуды в субавроральных широтах.

Сопоставление максимума интенсивности  $Pc1$  с положением пятна протонного свечения позволило бы проверить, действительно ли локализованные высыпания энергичных протонов и пятна протонных сияний являются индикатором области ионно-циклотронного взаимодействия. Для такого сопоставления желательно иметь плотную двумерную сеть станций, регистрирующих  $Pc1$ . К

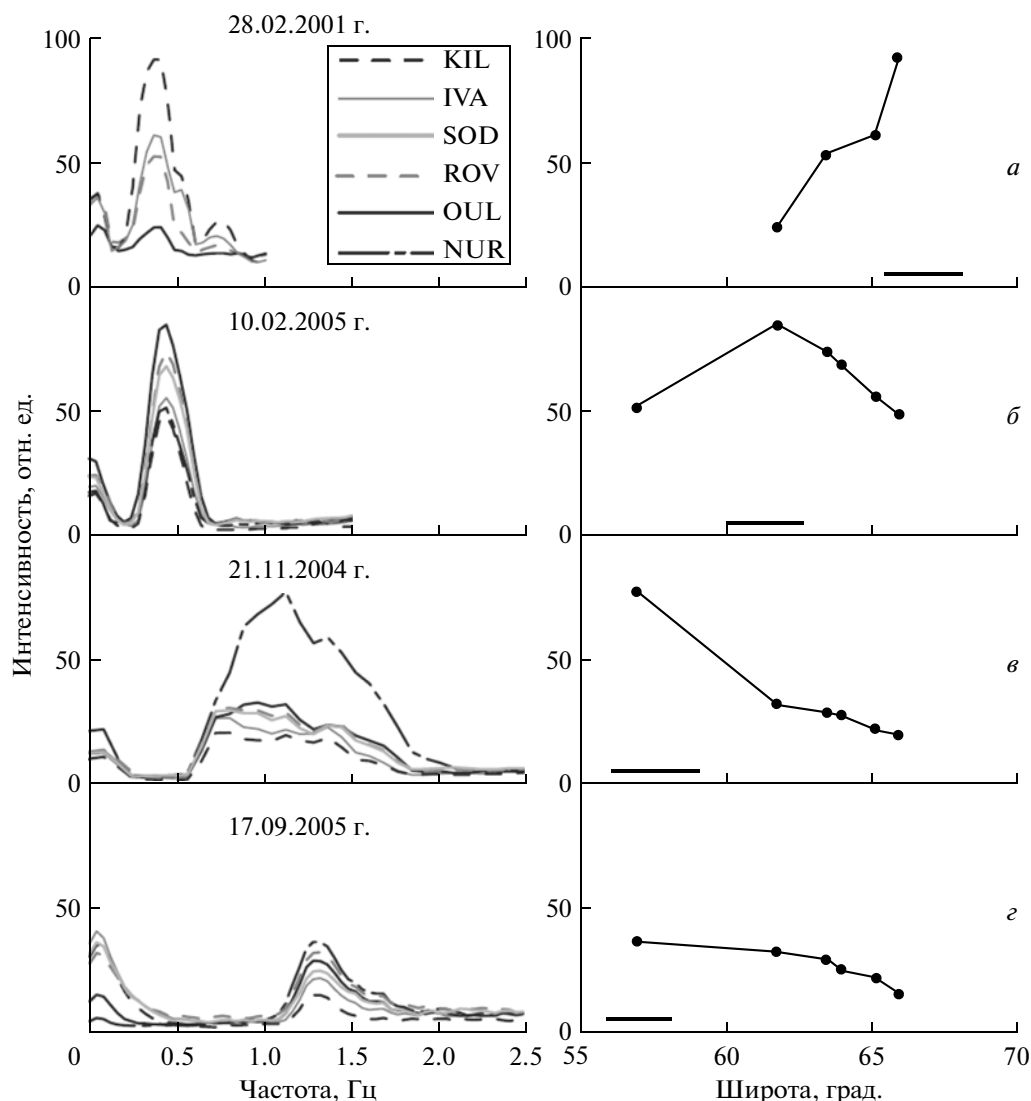
сожалению, такой сети в период работы спутника IMAGE не было. Поэтому, в данной работе мы сопоставим наблюдения протонных сияний со спутника IMAGE с данными меридиональной сети индукционных магнитометров в Финляндии. Мы рассмотрим те же события, что и в работе [Yahnin et al., 2007] за исключением одного, для которого цифровые данные регистрации геомагнитных пульсаций оказались утраченными. Во время этих наблюдений проекции пятен протонного свечения находились не более чем в двух часах MLT от сети наземных станций.

## 2. ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице приведены координаты станций финской сети индукционных магнитометров. Станции сети расположены на геомагнитных широтах  $56.9-65.9^\circ$  и  $MLT = UT + 2$ . Магнитометры имеют одинаковый линейный отклик  $1.4 \text{ В}/(\text{нТл Гц})$  на частотах выше  $0.05 \text{ Гц}$  с уровнем шума около  $1 \text{ пТл}/\text{Гц}^{1/2}$  на частоте  $1 \text{ Гц}$ . Частота сбора данных –  $40 \text{ Гц}$ . Магнитометры идентичны и взаимно калиброваны, поэтому их можно использовать для сопоставления интенсивности пульсаций вдоль меридиана.

Данные о протонных сияниях получены с помощью детектора SI12 прибора FUV на спутнике IMAGE [Mende et al., 2000]. Этот детектор измеряет линию  $121.82 \text{ нм}$ , которая соответствует смещенной из-за эффекта Доплера линии Лайман  $H$ -альфа излучения возбужденных атомов водорода, образующихся в процессе перезарядки высыпавшихся протонов при соударении с атмосферными молекулами.

В работе [Yahnin et al., 2007] для рассматриваемых событий приведены спектрограммы геомагнитных пульсаций по данным обсерватории Полярного геофизического института Ловозеро, находящейся вблизи финской сети магнитометров. На этих динамических спектрах в каждом событии видны пульсации  $Pc1$ .

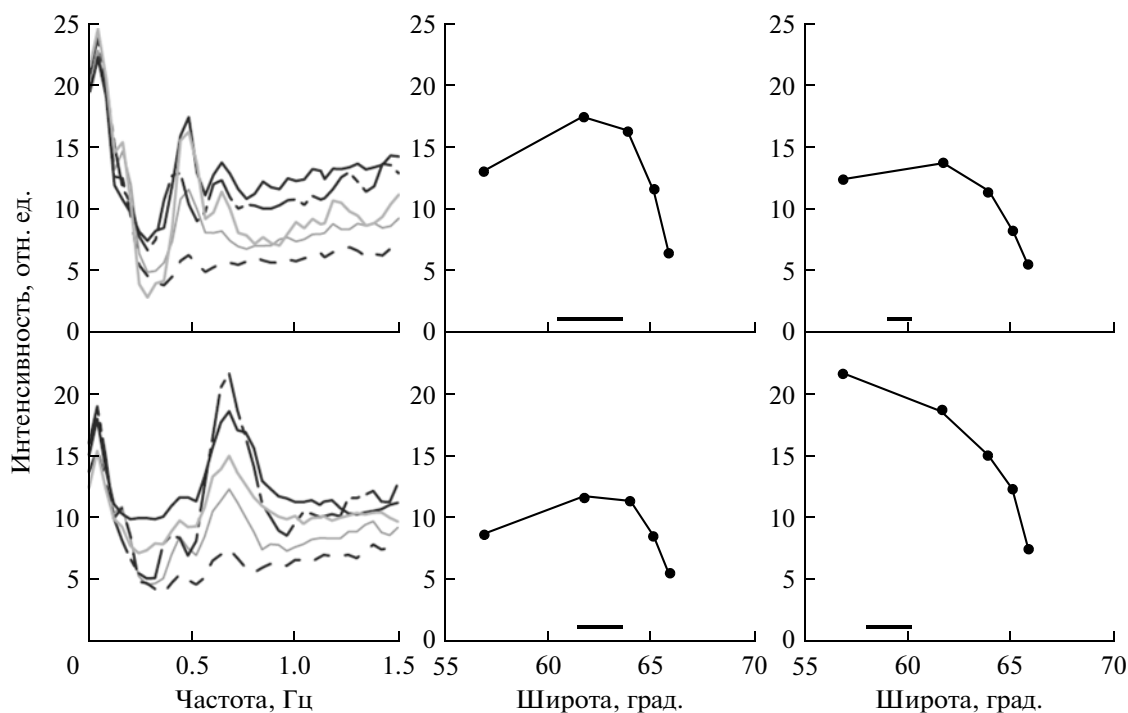


**Рис. 1.** Слева: спектры геомагнитных пульсаций для событий 28 февраля 2001 г. (а), 10 февраля 2005 г. (б), 21 ноября 2004 г. (в), 17 сентября 2005 г. (г). Справа: распределение интенсивности сигнала на частоте максимума вдоль меридиана для тех же событий. Широтное положение пятен протонного сияния показано горизонтальными отрезками.

По данным станций финской сети были построены спектры мощности геомагнитных пульсаций в  $H$  и  $D$  компонентах за выбранные интервалы времени. Для характеристики интенсивности сигнала была рассчитана величина  $P = P_H + P_D$ , т.е. сумма спектральной плотности мощности  $H$  и  $D$  компонент, соответственно. Для каждой станции были определены значения интенсивности на частоте спектрального максимума. Эти значения были использованы для построения широтных распределений интенсивности.

Спектры геомагнитных пульсаций приведены на рис. 1 (слева) для: 07:00–07:10 UT 28 февраля 2001 г. (а), 15:30–15:40 UT 10 февраля 2005 г. (б), 01:34–01:39 UT 21 ноября 2004 г. (в) и 23:20–23:30 UT 17 сентября 2005 г. (г). (Отметим, что в событии 28 февраля 2001 г. на станциях OUL и NUR на-

блюдения не проводились). В каждом событии на всех станциях видны усиления интенсивности в диапазоне частот, соответствующем  $Pc1$ . На рис. 1 (справа) показаны соответствующие широтные распределения интенсивности сигнала. В событии 28 февраля 2001 г. максимальная интенсивность  $Pc1$  наблюдалась на станции KIL, в событии 10 февраля 2005 г. – на станции OUL, а в событиях 21 ноября 2004 г. и 17 сентября 2005 г. – на станции NUR. Во всех этих случаях спутник IMAGE регистрировал пятно протонного сияния (примеры глобальных изображений протонных сияний для этих событий опубликованы в работе [Yahnin et al., 2007]). В интервале времени, для которого строился спектр интенсивности  $Pc1$ , пятно видно на нескольких последовательных изображениях, полученных со спутника с интервалом



**Рис. 2.** Спектры геомагнитных пульсаций 25 июня 2003 г. для интервалов времени 13:00–13:10 UT (слева сверху) и 13:10–13:20 UT (слева внизу). Распределение интенсивности сигнала вдоль меридиана в диапазонах 0.4–0.5 Гц (в центре) и 0.6–0.7 Гц (справа). Широтное положение пятен протонного сияния показано горизонтальными отрезками.

~2 мин. Размеры и положение пятна слегка меняются от одного изображения к другому [Frey et al., 2004]. Широтный диапазон, в котором наблюдалось пятно протонного свечения в каждом рассмотренном случае, показан на рис. 1 горизонтальным отрезком. Из этого рисунка видно, что положение пятна свечения соответствует положению максимума в широтном распределении интенсивности пульсаций в каждом случае.

В событии 25 июня 2003 г. наблюдались пульсации  $Pc1$  в двух полосах (0.4–0.5 и 0.6–0.7 Гц). На рис. 2 (слева) показаны спектры этих пульсаций, построенные для интервалов 13:00–13:10 UT (вверху) и 13:10–13:20 UT (внизу). (В этом событии наблюдения не проводились на станции ROV). В первом интервале максимальные интенсивности сигнала на частотах 0.4–0.5 Гц отмечены на станциях OUL и SOD (рис. 2, центральная часть верхней панели). В это время наблюдалось пятно протонного свечения, проекция которого приходилась на широты 60.5–63.5°. Второй спектральный максимум с меньшей интенсивностью в полосе 0.6–0.7 Гц хорошо различим на станциях NUR, OUL, SOD. Максимальные интенсивности сигнала отмечены в NUR и OUL (рис. 2, верхняя панель, справа). Начало сигнала в этой полосе (около 13:07 UT [Yahnin et al., 2007]) сопровождалось

появлением пятна протонного сияния на широтах 59–60°.

Во втором интервале времени (13:10–13:20 UT) соотношение между максимумами изменилось: интенсивность в полосе 0.4–0.5 Гц уменьшилась (при этом максимальные значения интенсивности, как и раньше, наблюдались на станциях OUL и SOD), а интенсивность в полосе 0.6–0.7 Гц увеличилась (рис. 2, нижняя панель). “Высокочастотный” спектральный максимум хорошо различим на всех станциях (при этом максимальные интенсивности вновь видны на станциях NUR и OUL). Такая динамика соотношения между спектральными максимумами согласуется с тем, что в этом интервале яркость первого пятна протонного свечения, которое теперь стало занимать диапазон широт 61.5–63.5° уменьшилась, и к 13:20 UT пятно исчезло [Yahnin et al., 2007]. Второе пятно в это время наблюдалось на широтах 58–60°.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенные на рис. 1 данные показывают, что максимум интенсивности  $Pc1$  всегда наблюдается на той станции, которая расположена ближе к проекции пятна протонного сияния. С некоторой погрешностью, которая характеризуется, во-первых, расстоянием между наземными стан-

циями, и, во-вторых, размерами и динамикой пятна протонного сияния внутри интервала определения интенсивности пульсаций на сети станций, можно утверждать, что максимум интенсивности пульсаций и проекция пятна протонного сияния пространственно совпадают.

В случае одновременного существования в магнитосфере нескольких областей ионно-циклотронного взаимодействия на разных расстояниях от Земли можно ожидать присутствия в спектре пульсаций максимумов на разных частотах. Магнитное поле в экваториальной плоскости магнитосферы, которое уменьшается с удалением от Земли, определяет гирочастоты ионов и, соответственно, частоту генерации ЭМИЦ волн (пульсаций  $Pc1$ ) (например, [Фейгин и Якименко, 1969]). Большему расстоянию от Земли (большей широте ионосферной проекции) источника соответствует меньшая частота. Событие 25 июня 2003 г. может служить примером одновременного существования двух источников ЭМИЦ волн. Каждому из двух спектральных максимумов соответствует свое распределение интенсивности сигнала вдоль меридиана, при этом максимум интенсивности для сигнала с большей частотой расположен на меньшей широте. (По-видимому, впервые аналогичный результат был получен в работе [Baransky et al., 1981]). Каждому спектральному максимуму соответствовало пятно протонного сияния. Как следует из рис. 2 пятно протонного сияния на большей широте соответствует максимум в распределении интенсивности пульсаций на меньшей частоте.

Использование меридиональной сети станций не позволяет судить о долготном распределении интенсивности  $Pc1$ . В работе [Hayashi et al., 1981] на основе рассмотрения данных двумерной сети магнитометров был сделан вывод о долготной локализации источника  $Pc1$  в пределах одного часа MLT. Размеры пятен протонного сияния согласуются с этой оценкой.

Поскольку и ЭМИЦ волны, и заряженные частицы достигают ионосферы, распространяясь вдоль силовых линий магнитного поля, пространственное соответствие максимумов интенсивности  $Pc1$  и субавроральных пятен протонного свечения, вместе с ранее установленной временной корреляцией этих явлений, является убедительным аргументом в пользу того, что пятно протонного свечения (локализованные протонные высыпания) являются результатом ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере, и на ионосферном уровне отображают область, где развивается эта неустойчивость.

Авторы благодарят Академию Финляндии за возможность посетить университет г. Оулу (Финляндия) в 2007 г., когда эти исследования были начаты, а также д-ра Т. Бёзингера (Т. Bösinger,

University of Oulu, Finland) за предоставление материалов сети магнитометров Финляндии и полезные обсуждения и д-ра Х. Фрея (H. Frey, University of Berkley, California, USA) за возможность использования базы данных прибора FUV спутника IMAGE.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН № VI.15 “Плазменные процессы в солнечной системе” и программы Президиума РАН № 22. Работа частично поддержана РФФИ грант № 11-02-00397.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова Н.В., Харченко И.П. Изменение интенсивности  $Pc1$  на меридиональном профиле // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 34. С. 74–76. Иркутск. 1974.
- Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие “жемчужин” при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 9. № 4. С. 700–705. 1969.
- Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Фрей Х. Идентификация источников геомагнитных пульсаций  $Pc1$  на основе наблюдений протонных сияний // Космич. исслед. Т. 46. № 4. С. 344–347 (Cosmic Research. P. 335). 2008.
- Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Кангас Й., Маннинен Ю. Локализованные увеличения потоков энергичных протонов на низких высотах в субавроральной области и их связь с пульсациями  $Pc1$  // Космич. исслед. Т. 40 № 3. С. 230–241 (Cosmic Research. P. 213). 2002.
- Baransky L., Golikov Yu., Feygin F., Kangas J., Pikkarainen T. Role of the plasmopause and ionosphere in the generation and propagation of pearl pulsations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 43. P. 875–881. 1981.
- Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M. Turbulent Loss of Ring Current Protons // J. Geophys. Res. V. 75(25). P. 4699–4709. 1970.
- Engebretson M.J., Posch J.L., Westerman A.M., Otto N.J., Slavin J.A., Le G., Strangeway R.J., Lessard M.R. Temporal and spatial characteristics of  $Pc1$  waves observed by ST5 // J. Geophys. Res. V. 113. A07206, doi:10.1029/2008JA013145. 2008.
- Erlandson R.E., Ukhorskiy A.J. Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering // J. Geophys. Res. V. 106. 3883–3895, doi:10.1029/2000JA000083. 2001.
- Frey H.U., Haerendel G., Mende S.B., Forrester W.T., Immel T.J., Ostgaard N. Subauroral morning proton spots (SAMPS) as a result of plasmopause-ring-current interaction // J. Geophys. Res. V. 109. A10305, doi:10.1029/2004JA010516. 2004.
- Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Tsuruda K., Machida S., Kitamura T., Saka O., Watanabe T. The extent of  $Pc1$  source region in high latitudes // Canadian Journal of Physics V. 59. P. 1097–1105. 1981.

- *Iyemori T., Hayashi K.* *Pc1* micropulsations observed by Magsat in the ionospheric *F* region // *J. Geophys. Res.* V. 94. P. 93–100. doi:10.1029/JA094iA01p00093. 1989.
- *Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O.* Morphology and physics of short-period magnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* V. 83. P. 435–512. doi:10.1023/A:1005063911643. 1998.
- *Mende S.B., et al.* Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design // *Space Sci. Rev.* V. 91. P. 243–270. 2000.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A.* Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 69. P. 1690–1706. doi:10.1016/j.jastp.2007.02.010. 2007.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U.* Subauroral proton spots visualize the *Pc1* source // *J. Geophys. Res.* V. 112. A10223, doi:10.1029/2007JA012501. 2007.
- *Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J.* Proton precipitation related to *Pc1* pulsations // *Geophys. Res. Lett.* V. 27(21). P. 3575–3578. 2000.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Ganushkina N.Y., Angelopoulos V., Mozer F.S., Kangas J., Manninen J., Fritz T.A., Russell C.T.* Multi-satellite study of phenomena in the evening magnetosphere during the *Pc1*–2 event // In: *Proceedings of XXV Apatity Seminar “Physics of Auroral Phenomena,”* Apatity, Russia, P. 85–88. 2002.
- *Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J., Evans D.S., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Thomsen M.F., Reeves G.D., Gvozdevsky B.B.* Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of *Pc1* and IPDP types // *Ann. Geophysicae* V. 21(12). P. 2281–2292. 2003.