

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ПЯТЕН ПРОТОННОГО СИЯНИЯ И МАКСИМУМА ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1

Т.А. Яхнина, А.Г. Яхнин (Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия)

Аннотация. 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 расположена ближе к проекции пятна протонного сияния. 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 [см., 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] 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 изотропии потоков энергичных ($E > 30$ кэВ) протонов были обнаружены локализованные высыпания энергичных протонов, которые оказались статистически связаны с генерацией геомагнитных пульсаций Pc1. Широтный размер таких высыпаний составляет около одного градуса, что согласуется с широтной локализацией пакетов ЭМИЦ волн при наблюдениях на низкоорбитальных спутниках [Iyemori and Hayashi, 1989; Engebretson 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 вызвать 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 высоко-апогейного 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 меридиана 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; Baransky 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 1 приведены координаты станций финской сети индукционных магнитометров. Станции сети расположены на геомагнитных широтах 56.9°–65.9° и MLT= UT+2. Магнитометры имеют одинаковый линейный отклик 1.4 В/(нТл*Гц) на частотах выше 0.05 Гц с уровнем шума около 1 пТл/Гц^{1/2} на частоте 1 Гц. Частота сбора данных – 40 Гц. Магнитометры идентичны и взаимно калиброваны, поэтому их можно использовать для сопоставления интенсивности пульсаций вдоль меридиана.

Таблица 1. 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

Данные о протонных сияниях получены с помощью детектора SI12 прибора FUV на спутнике IMAGE [Mende et al., 2000]. Этот детектор измеряет линию 121.82 нм, которая соответствует смещенной из-за эффекта Доплера линии Лайман Н–альфа излучения возбужденных атомов водорода, образующихся в процессе перезарядки высыпающихся 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.

По данным станций финской сети были построены спектры мощности геомагнитных пульсаций в Н 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 Н 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: 0700-0710 UT 28 февраля 2001 г. (а), 1530-1540 UT 10 февраля 2005 г. (б), 0134-0139 UT 21 ноября 2004 г. (в) и 2320-2330 UT 17 сентября 2005 г. (г). (Отметим, что в событии 28 февраля 2001 г. на станциях OUL и NUR наблюдения 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 ~ 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., 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 (не показано).

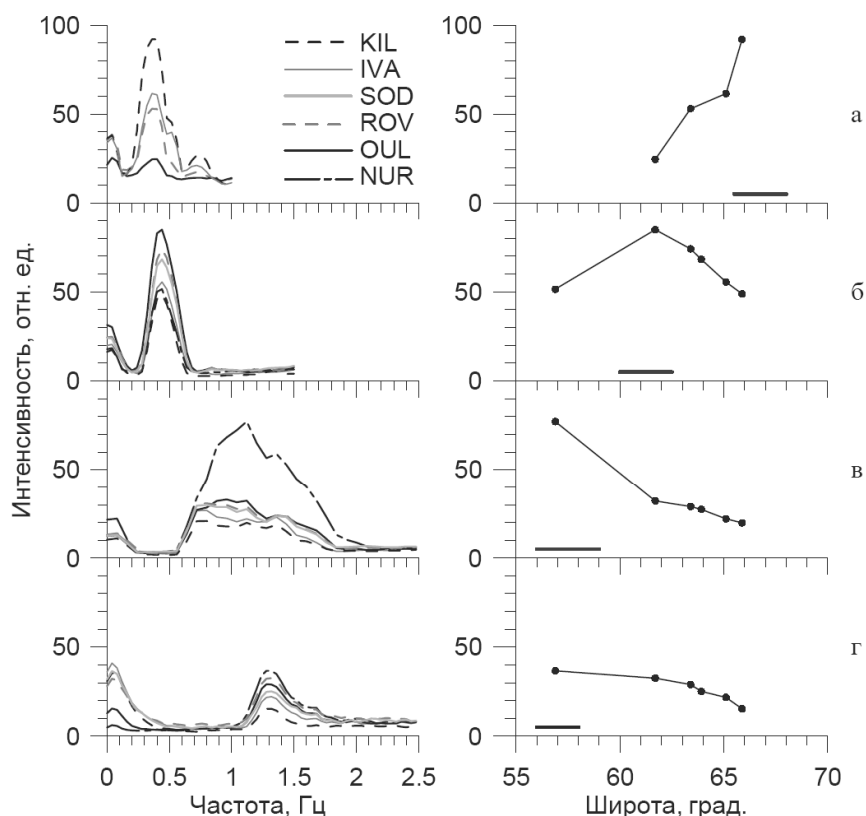


Рис. 1. Слева: спектры геомагнитных пульсаций для событий 28 февраля 2001 г. (а), 10 февраля 2005 г. (б), 21 ноября 2004 г. (в), 17 сентября 2005 г. (г).

Справа: распределение интенсивности сигнала на частоте максимума вдоль меридиана для тех же событий. Широтное положение пятен протонного сияния показано горизонтальными отрезками.

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 станциями, 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.

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 пятна 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. Böisinger, University of Oulu, Finland) за предоставление материалов сети магнитометров Финляндии и полезные обсуждения и д-ра Х. Фрея (Н. 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». Работа частично поддержана грантом РФФИ 11-02-00397.

Список литературы

- Виноградова Н.В., Харченко И.П. Изменение интенсивности Pc1 на меридиональном профиле // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Выпуск 34. С. 74-76. Иркутск. 1974.
- 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. 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. P. 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 Pc 1 source region in high latitudes // Can. J. Phys. V.59. P. 1097-1105. 1981.
- Iyemori T., Hayashi K. Pc 1 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., Heeterds H., Frey H.U., et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design // Space Sci. Rev. V. 91. P. 243– 270. 2000.
- Yahnin A.G., and Yahnina T.A. Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves // J. Atmos. Solar-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. P. 3575–3578. 2000.
- 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. Geophys. V. 21. P. 2281–2292. 2003.