

ОДНОВРЕМЕННЫЕ Pc5 ПУЛЬСАЦИИ В АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЯХ, ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ И РИОМЕТРИЧЕСКОМ ПОГЛОЩЕНИИ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко², С.Н. Самсонов³

¹ Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты

² Институт физики Земли РАН, г. Москва

³ Институт космических исследований и аэронавтики СО РАН, г. Якутск

Аннотация. В работе исследованы одновременные утренние Pc5 пульсации ($f \sim 2$ мГц) в геомагнитном поле, интенсивности полярных сияний (в эмиссиях кислорода 557.7, 630.0, а также в эмиссии азота 471 нм) и риометрическом поглощении по данным канадских станций сетей CARISMA, NORSTAR для события 01.01.2000. Хотя частоты авроральных, геомагнитных, и риометрических пульсаций близки, устойчивых фазовых соотношений между ними не наблюдается. Для авроральных Pc5 пульсаций наблюдается фазовое распространение с низких широт к более высоким, аналогичное одновременно наблюдаемым геомагнитным пульсациям. Геомагнитные Pc5 пульсации наблюдаются в существенно большем диапазоне широт и долгот, чем авроральные пульсации, при этом не все цуги геомагнитных пульсаций сопровождаются соответствующими авроральными пульсациями. Следовательно, геомагнитные Pc5 пульсации первичны по отношению к авроральным Pc5 пульсациям. Во время авроральных Pc5 пульсаций отношение эмиссий 557.7/630.0 становится заметно больше единицы, что говорит о том, что авроральные пульсации могут генерироваться за счет периодического ускорения магнитосферных электронов.

1. Введение

Pc5 пульсации (периоды порядка нескольких мин) являются одним из наиболее мощных проявлений волновой активности в околоземном космическом пространстве. Pc5 пульсации способны заметно модулировать потоки захваченных энергичных электронов и протонов в магнитосфере [Sarris et al., 2007], магнитосферную и ионосферную плазму. Модуляция потоков высыпающихся частиц Pc5 пульсациями проявляется при наземных наблюдениях в появлении модулированных риометрического поглощения [Olson et al., 1980; Белаховский и Пилипенко, 2008] или аврорального свечения [Yamatoto, 1988; Воробьев и др., 2008]. Одновременные наблюдения Pc5 пульсаций в сияниях и риометрическом поглощении могли бы дать важную информацию о характере взаимодействия волн и частиц в магнитосфере, т.к. они обусловлены электронами разных энергий: ~ 10 - 100 кэВ - риометры, ~ 1 кэВ - фотометры.

В последнее время появляется все больше экспериментальных свидетельств того, что Pc5 волны могут не только пассивно модулировать магнитосферные частицы, но и приводить к их ускорению. Ускоренные полем волны электроны могут получать энергию, достаточную для уярчения полярных сияний (т.н. "альвеновская аврора") [Samson et al., 2003]. Однако конкретный механизм ускорения пока не установлен. Предположительно, периодическое ускорение и высыпание электронов вызывается продольным электрическим полем E_{\parallel} волны. Таким полем обладают мелкомасштабные дисперсионные альвеновские возмущения [Stasiewicz et al., 2000], однако волны столь малых масштабом полностью экранировались бы ионосферой от наземных магнитометров.

В данной работе проанализировано событие, которое дает возможность исследовать механизмы генерации авроральных Pc5 пульсаций, их связь с соответствующими пульсациями в геомагнитном поле и риометрическом поглощении и ответить на вопрос о первичности пульсаций волн или частиц по данным меридиональных сетей сканирующих фотометров, магнитометров и риометров.

2. Данные наблюдений

Для наблюдения за полярными сияниями использованы данные меридиональных сканирующих фотометров сети NORSTAR (Канада), которые регистрируют полярные сияния в эмиссиях 557.7, 630.0, 486, 471 нм, на станциях PINA, GILL, RANK, FSMI. В работе были использованы данные канадских риометров сети NORSTAR. Для наблюдения за вариациями геомагнитного поля использованы данные станций сети CARISMA и геостационарных спутников GOES.

3. Событие 1 января 2000 г.

Pc5 пульсации с амплитудой до ~ 200 нТл и частотой ~ 2.2 мГц наблюдались в утреннем секторе в интервале времени 11.00-14.00 UT на меридиональном профиле магнитных станций PINA-ISLL-GILL-ESKI-RANK

(Рис. 1 в скобках указаны геомагнитные координаты станций). Широтная амплитудно-фазовая структура геомагнитных $Pc5$ пульсаций указывает на их резонансную природу – возбуждение локальных альвеновских колебаний силовой линией внешним гармоническим источником. Так, спектральный анализ показывает уменьшение частоты с увеличением геомагнитной широты, фазовые сдвиги между колебаниями на разных станциях указывают на кажущееся распространение с низких широт к более высоким, спектральная амплитуда колебаний имеет локальный максимум на резонансной магнитной оболочке $\sim 64^\circ$ (станция ISLL). Резонансная структура поля характерна для тороидальных альвеновских колебаний с малыми азимутальными волновыми числами $m \approx 1-5$. С этим согласуется преобладание азимутальной hn компоненты колебаний магнитного поля над радиальной he и продольной hp компонентами на геостационарном спутнике GOES-10, которое характерно для тороидальных альвеновских колебаний (Рис. 2).

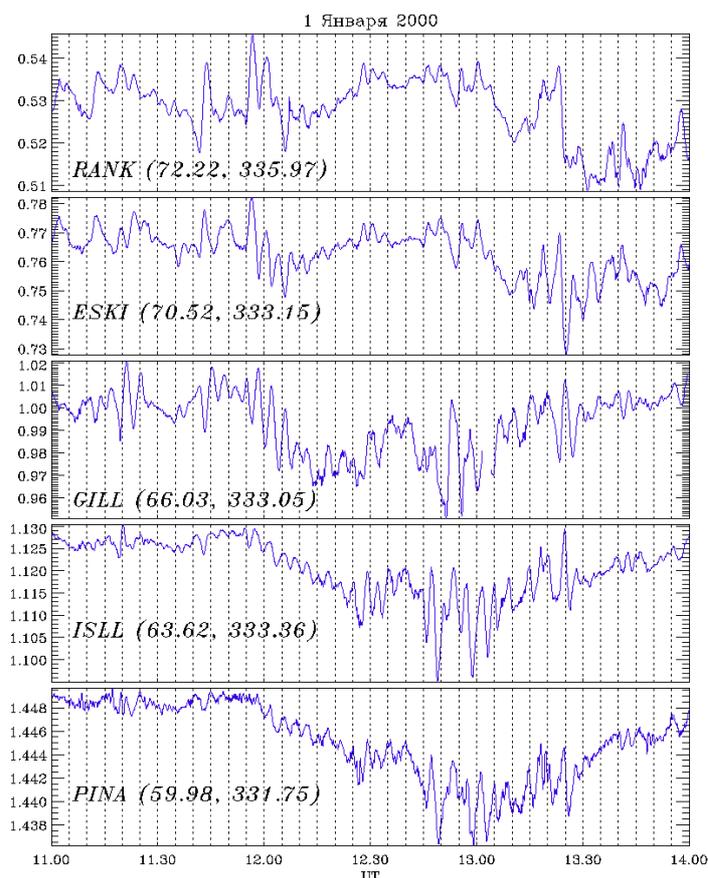


Рис. 1 Вариации X-компоненты геомагнитного поля [нТл* 10^4] по данным станций PINA-ISLL-GILL-ESKI-RANK 1.01.2000 г.

соотношений не наблюдается. Здесь впервые обнаружено, что геомагнитные $Pc5$ пульсации сопровождаются соответствующими пульсациями в полярных сияниях в эмиссии азота 471 нм (Рис. 6).

Для авроральных $Pc5$ пульсаций видна характерная структура (Рис. 5.), где каждый яркостный элемент наклонен вправо, что соответствует приходу частиц, вызывающих уярчение светимости сначала на более низкие широты, а затем - на более высокие. Кажущееся распространение с низких широт к более высоким является отражением фазовой структуры продольных токов, переносимых волной, в области альвеновского резонанса.

Авроральные и геомагнитные $Pc5$ пульсации сопровождаются соответствующими пульсациями в риометрическом поглощении (рис. 3, 4). Как отмечалось в [Белаховский и Пилипенко, 2010], риометрические колебания имеют вид кратковременного всплеска в момент синхронизации двух колебательных систем. Спектральный анализ показывает совпадение спектральных максимумов в вариациях магнитного поля, поглощения, интенсивности сияний. Однако не наблюдается устойчивых фазовых соотношений между $Pc5$ пульсациями в сияниях и поглощении, хотя корреляция между $Pc5$ пульсациями в интенсивности сияний и поглощении достаточно высока. Это может говорить о различном механизме генерации $Pc5$ пульсаций в поглощении и в сияниях.

Авроральные $Pc5$ пульсации занимают существенно меньший долготный диапазон, чем геомагнитные пульсации. Так на станции FSMI, удаленной на 26° геомагнитной долготы от станции GILL и находящейся с

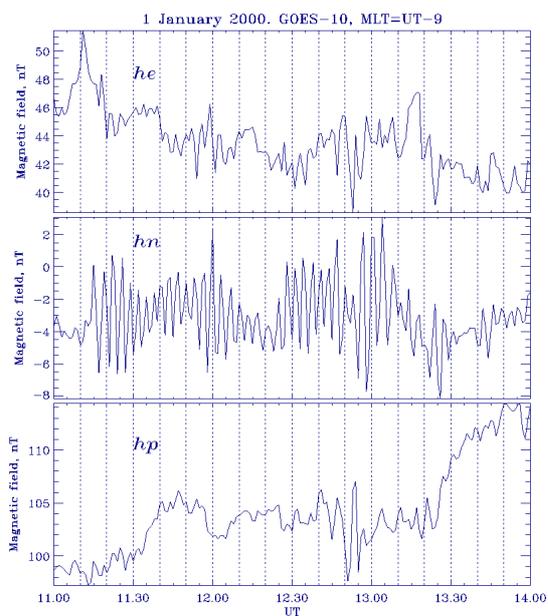


Рис. 2 Вариации геомагнитного поля по данным геостационарного спутника GOES-10 1.01.2000 г.

Геомагнитные $Pc5$ пульсации сопровождаются соответствующими пульсациями в авроральных эмиссиях 557.7 нм и 630.0 нм (Рис. 3, 4). Спектральный анализ показывает совпадение максимумов на $f=2.2$ мГц в интервале 12.00-13.30 UT, когерентность достигает 0.8, но устойчивых фазовых

ней примерно на одной широте, авроральные Pc5 пульсации уже видны очень слабо. Авроральные Pc5 пульсации наблюдаются и в более узком широтном интервале, чем геомагнитные пульсации. На станциях PINA (60°), RANK (72°) авроральные Pc5 пульсации уже не видны. Кроме того, далеко не все цуги геомагнитных Pc5 пульсаций сопровождаются соответствующими авроральными Pc5 пульсациями. Данный факт говорит о том, что геомагнитные Pc5 пульсации являются источником соответствующих пульсаций в сияниях, а не наоборот, как предполагалось Yamamoto et al. [1988] за счет локального изменения ионосферной проводимости пульсирующими потоками частиц.

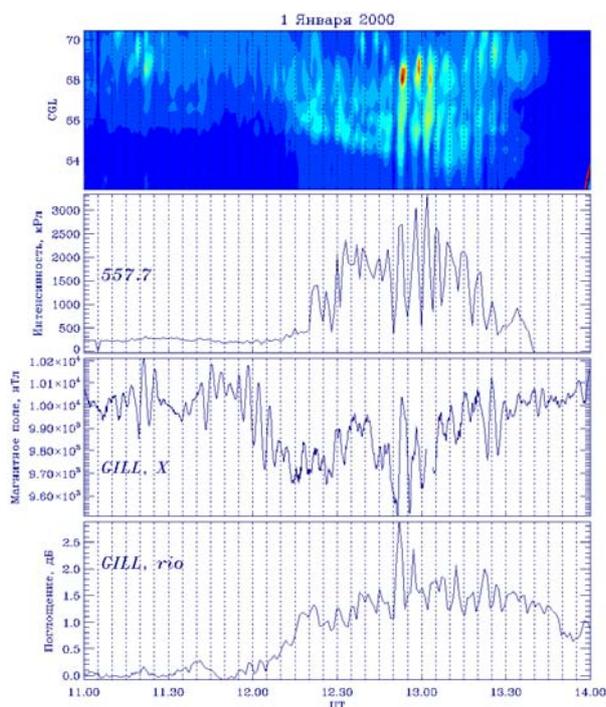


Рис. 3 Кеограмма интенсивности сияний по данным фотометра на GILL в эмиссии 557.7 нм; вариации интенсивности сияний на $\Phi=65^\circ$; вариации X-компоненты геомагнитного поля и риометрического поглощения на станции GILL.

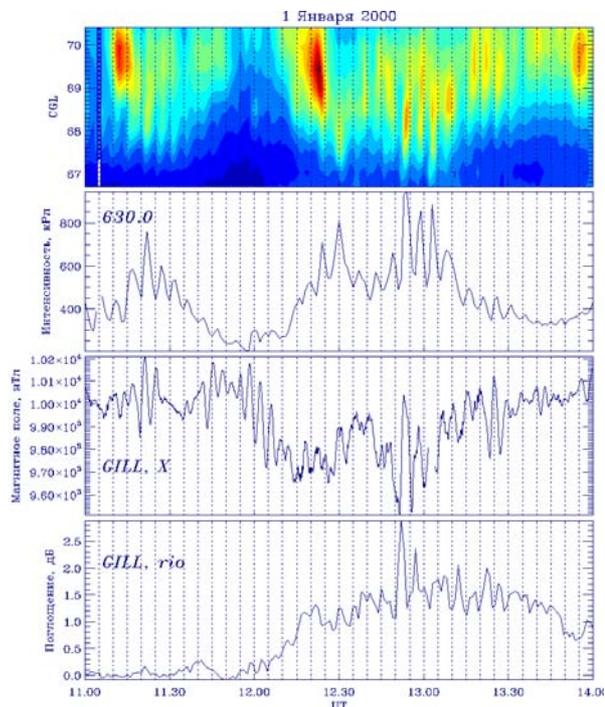


Рис. 4 Кеограмма интенсивности сияний по данным фотометра на GILL в эмиссии 630.0 нм; вариации интенсивности сияний на $\Phi=68^\circ$; вариации X-компоненты геомагнитного поля и риометрического поглощения на GILL.

При появлении авроральных пульсаций, отношение интенсивностей Pc5 пульсаций в эмиссиях 557.7/630.0 становится много больше 1 (Рис. 6). 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. Следовательно, геомагнитные Pc5 пульсации вызывают не просто периодическую модуляцию высыпающихся частиц, но и приводят к дополнительному периодическому ускорению электронов.

4. Обсуждение и выводы

Структура авроральных Pc5 пульсаций в эмиссиях 557.7, 630.0 нм (распространение с низких широт к более высоким) отражает резонансную структуру поля одновременно наблюдаемых геомагнитных Pc5 пульсаций. Авроральные Pc5 пульсации наблюдаются в существенно более узком широтном и долготном интервалах, чем геомагнитные пульсации. Широтный масштаб области ускорения авроральных электронов в ионосфере, судя по кеограммам излучения 557.7 нм, составляет $\sim 0.3^\circ$, т.е. ~ 30 км. По-видимому, это масштаб соответствует характерному размеру резонансной области в ионосфере.

Не наблюдается устойчивых фазовых соотношений между Pc5 пульсациями в риометрическом поглощении и сияниях, что может говорить о различном механизме высыпания энергичных (~ 10 - 100 кэВ) и надтепловых (~ 0.1 - 1 кэВ) электронов. Резкое увеличение отношения интенсивностей эмиссий 557.7/630.0 в период появления Pc5 колебаний, говорит о том, что Pc5 пульсации приводят к периодическому ускорению электронов в магнитосфере.

Модулированное высыпание энергичных электронов, проявляющееся в пульсациях риометрического поглощения, нельзя объяснить механизмом Coroniti & Kennel [1970], т.к. рассматриваемые Pc5 колебания не создают сжатия магнитного поля $b_{||}$ в магнитосфере. Каким образом, низкочастотные волны могут нарушить

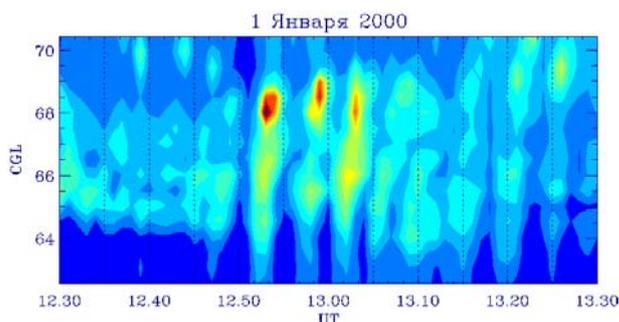


Рис. 5 Кеограмма интенсивности сияний по данным фотометра GILL в эмиссии 557.7 нм в интервале времени 12.30-13.30 UT.

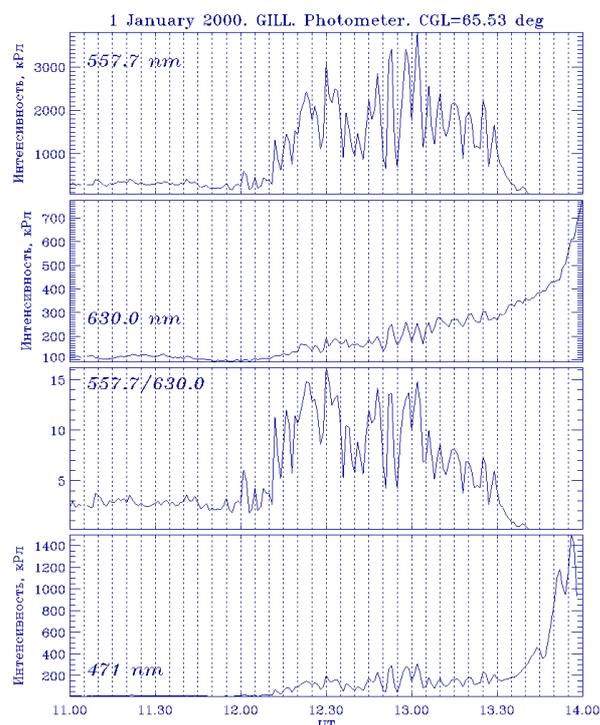


Рис. 6 Интенсивность полярных сияний в эмиссиях 557.7, 630.0 нм, отношение интенсивностей 557.7/630.00, интенсивность в эмиссии 471 нм на геомагнитной широте 65° по данным меридионального сканирующего фотометра на станции GILL.

wave damping in the auroral acceleration region, *J. Geophys. Res.*, 106, 6203-6212, 2001.

- Olson J.V., G. Rostoker, G. Olchowy. A study of concurrent riometer and magnetometer variations in the Pc4-5 pulsation band, *J. Geophys. Res.*, 85, 1695, 1980.

- 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. Geophysicae*, 21, 933-945, 2003.

- Sarris T.E., T.M. Loto'aniu, X. Li, H.J. Singer. Observations at geosynchronous orbit of a persistent Pc5 geomagnetic pulsation and energetic electron flux modulations, *Ann. Geophys.*, 25, 1653-1667, 2007.

- 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.*, 93, 423-533, 2000.

- Yamamoto T., Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Ogawa T. Auroral activities and long-period geomagnetic pulsations: Pc5 pulsations and concurrent auroras in the dawn sector, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 40, 553-569, 1988.

адиабатичность движения энергичных электронов и привести к их высыпанию в конус потерь, остается невыясненным.

Для наблюдаемого поперечного масштаба области авроральной светимости ~ 30 км, кинетические поправки (обусловленным конечным ларморовским радиусом или инерционной электронной длиной) оказываются слишком малы, чтобы обеспечить появление в волне E_{\parallel} заметной величины. По нашему мнению появление E_{\parallel} обусловлено наличием на авроральных широтах области аврорального ускорения (AAR), в которой на высотах 1-2 R_E образуется нерезистивное падение потенциала (т.н. пробочное сопротивление - *mitgog resistance*) вдоль силовой линии. Взаимодействие альвеновской волны с AAR приводит к появлению пульсирующего продольного электрического поля, вызывающего дополнительное ускорение авроральных электронов. Наиболее эффективным такое взаимодействие оказывается на поперечных масштабах волны порядка альвеновской диссипативной длины λ_A , которая для типичных значений пробочного сопротивления составляет первые десятки километров [Fedorov et al., 2001].

Данная работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-05-00273 и 12-05-98522, Программ Президиума РАН №4 и №22. Выражаем благодарность за предоставленные данные проектов NORSTAR, CARISMA, спутника GOES сотрудникам соответствующих центров.

Список литературы

- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А. Возбуждение Pc5 пульсаций геомагнитного поля и риометрического поглощения, *Космические исследования*, 48, 319-334, 2010.

- 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 аэрномия*, 48, 162-172, 2008.

- Coroniti F.V., Kennel C.F. Electron precipitation pulsations, *J. Geophys. Res.*, 75, 1279-1289, 1970.

- Fedorov E., V. Pilipenko, M.J. Engebretson, ULF