

## “НЕКЛАССИЧЕСКИЕ” ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5 В ПОСЛЕПОЛУДЕННОМ СЕКТОРЕ

В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко, М.С. Петрищев, П.А. Сергушин, А.Л. Котиков, П.Е. Терещенко,  
Д.М. Яковлев, Д.Б. Зайцев, В.А. Леваненко, Д.Ю. Сарычев

г. Санкт-Петербург, СПбФ ИЗМИРАН, e-mail: office@izmiran.spb.ru

**Аннотация.** 27.08.2014 г. в послеполуденном секторе в интервале исправленных геомагнитных широт  $\Phi=56^{\circ}-68^{\circ}$  с.ш. наблюдалось несколько всплесков геомагнитных пульсаций Pc5 с периодом  $\sim 360$  с и с амплитудами до 100 нТл. Пульсации имели эллиптическую поляризацию, причем сдвиг фаз между компонентами составлял около четверти периода (Н компонента опережает D компоненту, а D опережает Z). По данным трехкомпонентных магнитных станций двумерной сети IMAGE и станций, расположенных на территории России, показано, что эти пульсации имеют особенности, отличающие их от классических резонансных пульсаций Pc5. В отличие от классических Pc5 исследуемые пульсации возникают в конце предварительной фазы положительной суббури и имеют сильное затухание в широтном и долготном направлениях. Установлено также, что источники этих пульсаций двигаются поперек геомагнитных меридианов в западном направлении против направления вращения Земли (к полуденному меридиану) со скоростью 1.2-1.5 км/с. Для объяснения особенностей, наблюдаемых на земной поверхности пульсаций Pc5 в качестве источника наблюдаемых пульсаций Pc5 предлагается модель в виде последовательности пар продольных токов (втекающий и вытекающий). Продольные токи перемещаются поперек геомагнитных меридианов в западном направлении и вызывают появление ионосферных холловских токовых вихрей. Магнитный эффект токовых вихрей, проходящих над расположенной на земной поверхности магнитной станцией и формирует колебания магнитного поля очень похожие на резонансные Pc5.

**Введение.** Геомагнитные пульсации Pc5 представляют собой квазисинусоидальные колебания геомагнитного поля и занимают диапазон периодов от 150 до 600 с. Пульсации Pc5 могут достигать амплитуд в десятки и сотни нТл. Изучение этих пульсаций проводится давно [Троицкая, 1956], но и в последние годы исследованиям Pc5 посвящено много работ, например, [Большакова и др., 1994; Trivedi et al., 1997; Клейменова и Козырева, 2005; Kleimenova et al., 2005; Lee et al., 2007]. В качестве основного механизма генерации Pc5 обычно рассматривается основная резонансная мода МГД волн на геомагнитных силовых линиях [Пудовкин и др., 1976]. В работе [Yumoto and Saito, 1980; Chen and Hasegawa, 1974] рассматривается возбуждение поверхностных волн, возникающих на магнитопаузе, вследствие развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при обтекании флангов магнитосферы плазмой солнечного ветра. Энергия этих волн передается во внутреннюю магнитосферу и возбуждает резонансные МГД колебания. Возможные механизмы генерации дневных глобальных Pc5-пульсаций подробно обсуждались в ряде работ [Trivedi et al., 1997; Клейменова и Козырева, 2005а; Клейменова и Козырева, 2005б; Lee et al., 2007]. В работе [Kleimenova et al., 2005] в послеполуденном секторе обнаружены две зоны, в которых одновременно наблюдались пульсации Pc5. В более северной зоне наблюдались обычные резонансные Pc5. Для более южной зоны было установлено, что морфологические характеристики пульсаций в послеполуденном секторе не соответствуют свойствам резонансных колебаний. В данной работе исследуются геомагнитные пульсации, имеющие особенности отличающие их от резонансных Pc5.

**Экспериментальные результаты.** 27.08.2014 г. в послеполуденном секторе на земной поверхности в интервале исправленных геомагнитных широт  $\Phi=56^{\circ}-68^{\circ}$  наблюдалось несколько всплесков геомагнитных пульсаций Pc5 с амплитудами до 100 нТл и с периодом  $T \sim 360$  с. На рис. 1 представлены магнитограммы трех компонент вариаций магнитного поля зарегистрированные в п. Лехта (Карелия) в интервале времени 15:30 - 18:30 LT. Из рисунка видно, что пульсации Pc5 имели эллиптическую поляризацию, причем сдвиг фаз между компонентами составлял около четверти периода - Н компонента опережает D компоненту, а D опережает Z (вертикальная линия на рисунке позволяет определить эту особенность).

Для исследования события Pc5 использованы данные трехкомпонентных магнитных станций двумерной сети IMAGE и станций расположенных на территории России (Лехта -33 на рис. 2, Карпогоры - 34, Ловозеро - 35, Новосибирск, Иркутск, Лопарская). Расположение магнитных станций показано на рис.2 в исправленных геомагнитных координатах. Станции Норильск и Иркутск расположены восточнее границ рисунка и на рис. 2 не показаны. Станции, расположенные возле пунктирной линии на рис. 2, использовались в дальнейшем для построения эквивалентных токов.

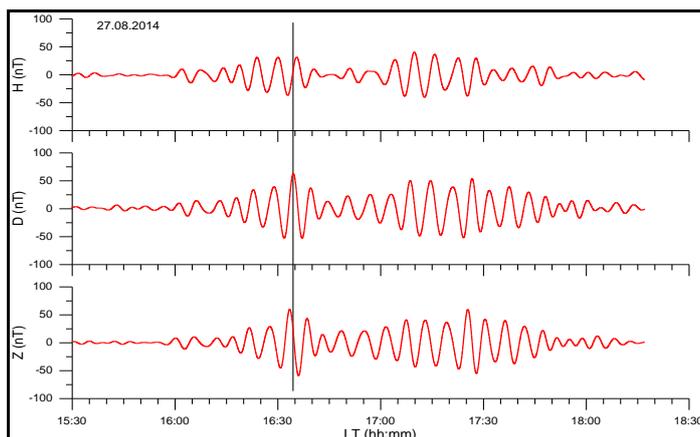


Рисунок 1. Геомагнитные пульсации Pc5 ( $T \sim 360$  с)

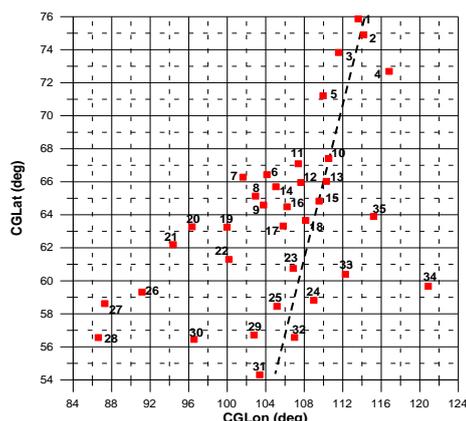


Рисунок 2. Расположение магнитных станций

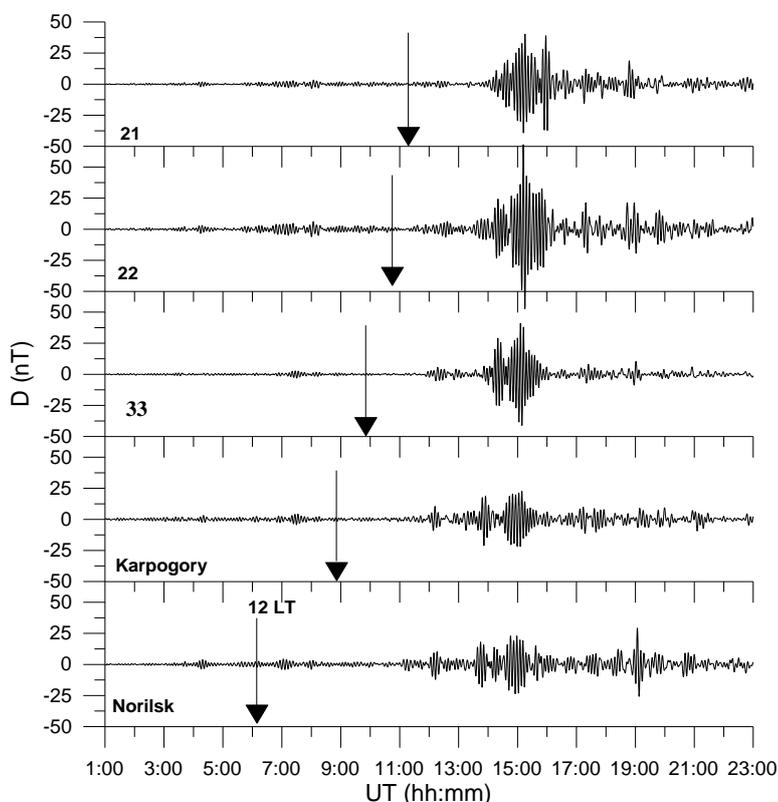


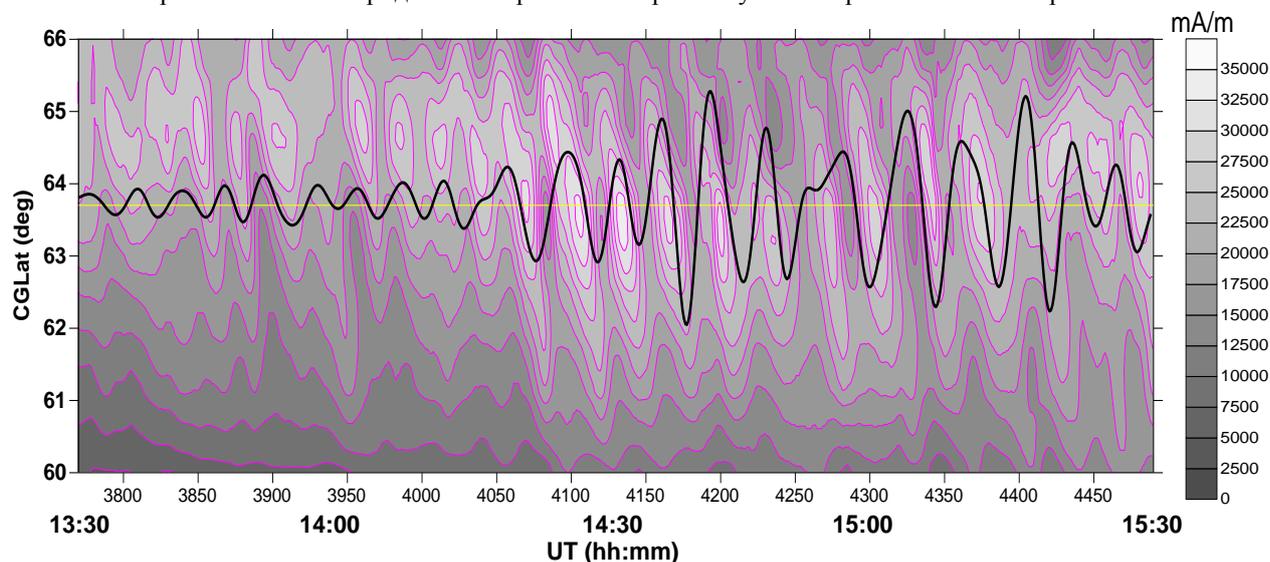
Рисунок 3. Вариации D-компоненты магнитного поля на 5 магнитных станциях, отфильтрованные в диапазоне периодов  $T=310-400$  с.

черной линией. Из рисунка отчетливо виден наклон вытянутых почти вдоль геомагнитного меридиана областей повышенной и пониженной интенсивности - северные части этих областей проявляются раньше южных. Этот эффект можно объяснить движением источника Pc5 на запад. Используемая для построения эквивалентных токов цепочка магнитных станций (пунктирная линия на рис. 2) имеет наклон к геомагнитному меридиану, поэтому северные части любой из областей интенсивности эквивалентных токов при движении вдоль одной широты приходят на эту цепочку раньше, чем южные. Из рисунка хорошо видно, что область наблюдения Pc5 на земной поверхности занимает по широте не более  $4^\circ - 5^\circ$  при достаточно большой амплитуде. На рис. 5 с шагом 2 мин. представлены мгновенные двумерные распределения амплитуд трех компонент пульсаций Pc5 для интервала времени 11:12-11:26 UT 27.08.2014 г. Для построения рисунка использованы данные магнитных станций двумерной сети IMAGE и данные российских станций (рис. 2). Данные с каждой станции фильтровались в диапазоне периодов  $T=310-400$  с. Максимальная амплитуда отмечена белым цветом, а минимальная - черным. На рис. 5 хорошо заметна локальность

На рис. 3 представлены вариации D компоненты магнитного поля 27.08.2014 г. Использовались фильтрованные ( $T = 310-400$  с) данные 5 магнитных станций расположенных примерно вдоль исправленной геомагнитной широты  $63^\circ$ . Вертикальные стрелки на каждой панели отмечают локальный полдень. Как видно из рисунка, все события Pc5 наблюдаются в послеполуденном секторе. На самой западной станции 21 всплеск Pc5 произошел в 15-17 LT, а на самой восточной (Норильск) - в 19-21 LT. Максимальная амплитуда пульсаций отмечается на станции 22.

На рис. 4 построено распределение вариаций интенсивности эквивалентных ионосферных токов. Максимальная интенсивность отмечена на рисунке белым цветом, минимальная - темно-серым. Для построения рис. 4 использованы данные магнитных станций расположенных примерно на геомагнитном меридиане, отмеченном на рис. 2 пунктирной линией. Белая горизонтальная линия на рис. 4 отмечает исправленную геомагнитную широту станции 18 (рис. 2). Магнитограмма H-компоненты показана на рисунке

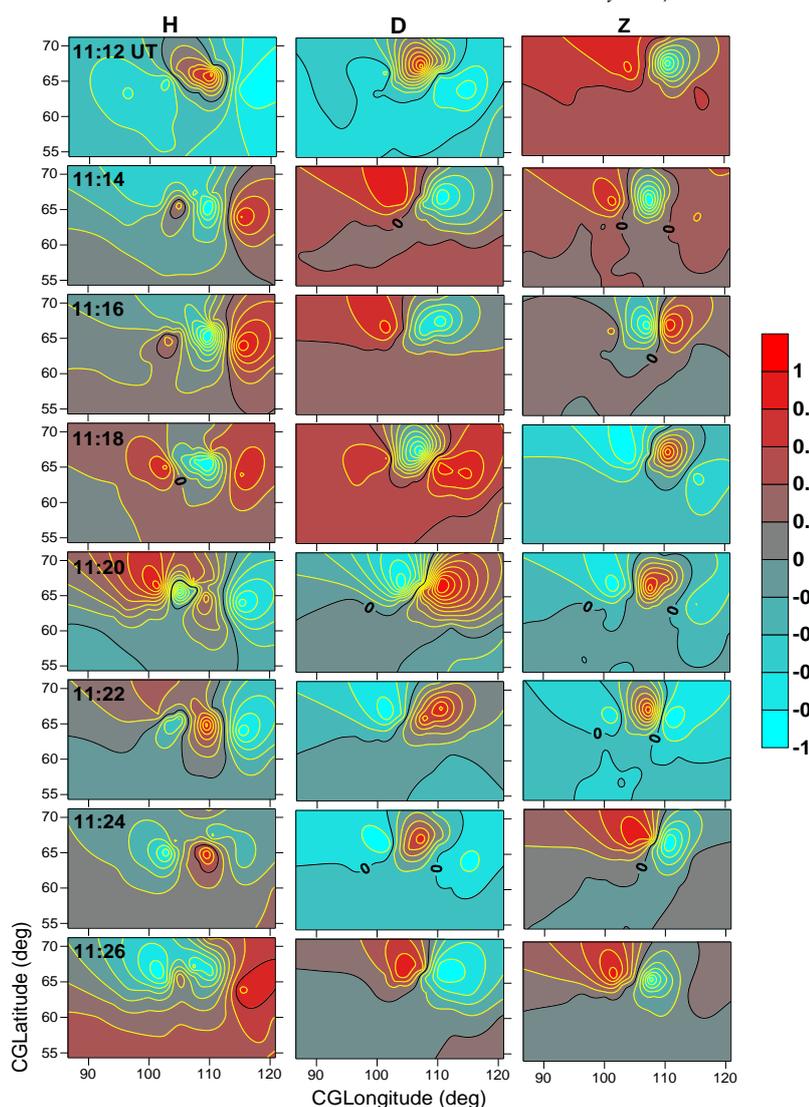
распределения амплитуд на земной поверхности –  $\sim 5^\circ$  по широте и по долготе. Западный дрейф источников Pc5 отчетливо виден по смещению на запад областей максимальных и минимальных амплитуд. Скорость перемещения источников Pc5 по земной поверхности (фазовая скорость) определялась по фазовому смещению экстремумов амплитуд каждой из магнитных компонент на соседних станциях и составляет 1.2-1.5 км/с поперек магнитных меридианов и практически равна нулю поперек магнитных параллелей.



**Рисунок 4.** Вариации интенсивности эквивалентных ионосферных токов на меридиональной цепочке станций.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 видно, что в исследуемом событии наблюдается до двух десятков периодов колебаний типа Pc5 в течение  $\sim 2$  часов. По скорости движения источников Pc5 вдоль земной поверхности (1.2-1.5 км/с) и периоду пульсаций ( $\sim 360$  с) можно определить долготную область, в которой наблюдается амплитуда одного колебания. Она составляет  $\sim 500$  км ( $\lambda = V \cdot T$ ) на уровне земной поверхности и  $\sim 2000$  км в проекции на плазмопаузу ( $L=4$ ). Если наблюдается большое количество независимых источников существующих одновременно, то область занятая этими Pc5 будет составлять  $\sim 10000$  км на земной поверхности и  $\sim 40000$  км в магнитосфере. Пульсации Pc5 регистрируются магнитными станциями (рис. 3) в течение  $\sim 2$  час. ( $30^\circ$  по долготе) и, соответственно, долготная область наблюдаемых Pc5 не превышает 3000 км на земной поверхности и 12000 км в магнитосфере. По-видимому, имеется локальная область в вечернем секторе магнитосферы (возможно, на плазмопаузе), где происходит возбуждение источников наблюдаемых пульсаций Pc5, которые затем распространяются по поверхности плазмосферы. Плазменная неустойчивость, создающая колебания плазмопаузы в направлениях от Земли – к Земле, по-видимому, возникла на плазмопаузе в вечернем секторе в районе выноса плазмы из магнитосферы (drainage plume). Чтобы волны, распространяющиеся по плазмопаузе от области неустойчивости, затухали достаточно слабо, неоднородности холодной плазмы должны быть много меньше по размерам, чем длина волны ( $\sim 2000$  км). Однако, в течение 5 суток (22-26.08.2014) перед событием Pc5 наблюдается крайне низкая магнитная активность. Трехчасовые Kp-индексы не превышали значения 2 (суммарный суточный Kp-индекс был менее 8) и только 27.08.2014 к 12 UT Kp-индексы достигли значения 4. В таких условиях дневная плазмосфера раздувается до 6 Re [Goldstein et al., 2003]. При начале усиления магнитной активности, вероятно, формируется однородная плазмопауза, что позволяет волнам на плазмопаузе проходить большое расстояние.

В работе [Tagirov and Ismagilov, 1989] для объяснения наблюдаемой особенности геомагнитных вариаций Ps6 (сдвиг по фазе на четверть периода между горизонтальными магнитными компонентами) в качестве источника Ps6 было предложено последовательность перемещающихся ионосферных холловских токовых вихрей, создающих в точке наблюдения вариации с необходимым фазовым сдвигом. Холловские вихри вызываются продольными токами, связывающими ионосферу с магнитосферой. В работе [McGenry et al., 1990] предложена такая же модель для зарегистрированных на канадской цепочке станций вариаций с периодом  $\sim 15$  мин. В исследуемых Pc5 также наблюдается фазовый сдвиг в четверть периода между горизонтальными компонентами, поэтому в качестве источника наблюдаемых пульсаций Pc5 предлагается такая же модель в виде последовательности пар продольных токов (втекающий и вытекающий). Продольные токи перемещаются поперек геомагнитных меридианов в западном направлении и вызывают появление ионосферных холловских токовых вихрей. Магнитный эффект токовых вихрей, проходящих над расположенной на земной поверхности магнитной станцией и формирует колебания магнитного поля очень похожие на классические Pc5.



**Рисунок 5.** Мгновенные двумерные распределения амплитуд трех компонент пульсаций Pc5 в интервалы времени 11:12-11:26 UT 27.08.2014 г.

**Выводы.** По данным трехкомпонентных магнитных станций двумерной сети IMAGE и станций, расположенных на территории России, показано, что исследуемые пульсации имеют особенности, отличающие их от классических пульсаций Pc5, а именно:

- в течение 5 суток перед событием Pc5 наблюдается крайне низкая магнитная активность;
- возникают в конце предварительной фазе суббури;
- очень локальны и сильно затухают в долготном и широтном направлениях;
- источники движутся в западном направлении к полуденному меридиану (против вращения Земли) со скоростями 1.2-1.5 км/с.

В качестве источника наблюдаемых в исследуемом событии пульсаций Pc5 предлагается последовательность перемежающихся поперек геомагнитных меридианов продольных токов, которые возникают вследствие неустойчивости плазмы на плазмопаузе. Условия для развития неустойчивости могут выполняться в районе сопряжения плазмосферы и области выноса плазмы из магнитосферы в направлении Солнца (drainage plum), расположенной в вечернем секторе (~17-20 LT).

#### Список литературы

Большакова О.В., Боровкова О.К., Клейменова Н.Г. и др. Магнитная буря 1989 года: структура экстремально возмущенной магнитосферы по геомагнитным пульсациям

- Pc5 // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, №4. С. 73–83.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций Pi3 и Pc5 во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия, 2005а, Т. 45, №1, С. 75–83.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Интенсивные геомагнитные пульсации Pc5 в восстановительную фазу супербури октября и ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия, 2005б. Т. 45, №5. С. 597–612.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л., Изд. Ленингр. Ун-та, 1976, 271с.
- Троицкая В.А. Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли // В кн.: Вопросы изучения переменных электромагнитных полей в Земле. М., 1956, с.27-61.
- Goldstein J., B. R. Sandel, M. R., Hairston and P. H. Reiff. Control of plasmaspheric dynamics by both convection and subauroral polarization stream // Geph. Res. Let., V.30, N24, 2003, p.1–5.
- Hudson M.K., Denton R.E., Lessard M.R., et al. A study of Pc-5 ULF oscillations // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 289–302.
- Dmitriev A., Chao J.-K., Thomsen M., Suvorova A. Geosynchronous magnetopause crossings on 29-31 October 2003 // J. Geophys. Res. V. 110, N A08209. doi:10.1029/2004JA010582. 2005.
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Manninen J., Ranta A. Unusual strong quasi-monochromatic ground geomagnetic Pc5 pulsations in the recovery phase of November 2003 super-storm // Ann. Geophys., 2005, V.23, P. 2621–2634.
- Lee E.A., Mann I.R., Loto'aniu T.M., Dent Z.C. Global Pc5 pulsations observed at unusually low L during the great magnetic storm of 24 March 1991 // J. Geophys. Res. 2007. V.112, N A05208. doi:10.1029/2006JA011872.
- Motoba T., Kikuchi T., Luhr H., et al. Global Pc5 caused by Dp-2-type ionospheric current system // Ibid. V. 107, N A2. 10.1029/2001JA900156.
- McGenry M.A., C.R. Clauer, E. Friis-Christensen, P.T. Newell, J.D. Kelly. Ground Observations of Magnetospheric Boundary Layer Phenomena // J.G.R., V. 95, NO. A9, 1990, P. 14995-15005.
- Tagirov V.R., Ismagilov V.S. Formation of auroral torch structure // In book: Полярные геомагнитные возмущения и связанные с ними явления. Апатиты, изд. КНИЦ АН СССР, 1989, с.88-91.
- Trivedi N.B., Arora B.R., Padiha A.L., et al. Global Pc5 geomagnetic pulsations of March 24, 1991, as observed along the American sector // Geophys. Res. Lett. 1997, V. 24, P. 1683–1687.
- Yumoto K., Saito T. (1980) Hydromagnetic wave driven by velocity shear instability in the magnetospheric boundary layer // Planet. Space Sci. 28:789.