

УДК 523.62.726

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ $Pc5$, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОТ МОДЫ СООТВЕТСТВУЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ (ПОЛОИДАЛЬНОЙ ИЛИ ТОРОИДАЛЬНОЙ)

© 2013 г. В. К. Ролдугин

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

e-mail: rold_val@pgia.ru

Поступила в редакцию 30.05.2011 г.

После доработки 08.10.2012 г.

Исследовано 36 случаев геомагнитных пульсаций $Pc5$ на геостационарном спутнике GOES-8 за 2001 г. с амплитудой в несколько нТл и длительностью около часа. Из них 22 случая были тороидальными, а 14 – полоидальными. Все эти пульсации были сопоставлены с геомагнитными наблюдениями в обс. Poste-de-la-Baleine (PBQ), расположенной вблизи проекции спутника. Было установлено, что частота пульсаций на Земле и в магнитосфере не всегда совпадает. Обнаружено, что у полоидальных колебаний наблюдается небольшая амплитуда на Земле и большая в магнитосфере, а у тороидальных – наоборот. Амплитуда наземных пульсаций больше зависит от величины азимутальной, чем радиальной компоненты поля в магнитосфере.

DOI: 10.7868/S0016794013020144

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже на первых спутниковых измерениях в магнитосфере были обнаружены регулярные геомагнитные пульсации диапазона $Pc5$. Zhu and Kivelson [1991] при исследовании длиннопериодных пульсаций на спутниках ISEE 1 и 2 разбили их на два класса по характеру поляризации – волны сжатия, когда силовые линии движутся в плоскости магнитного меридиана, и поперечные, когда колебания происходят в азимутальном направлении. Обнаружено различие в поведении этих мод: поперечные волны чаще наблюдаются в ночные часы, а волны сжатия – в вечерние и утренние, и в них плазменное и магнитное давление изменяются в противофазе.

Сопоставление пульсаций в магнитосфере с наземными вблизи силовой линии спутника проводилось неоднократно. Volwerk et al. [2005] наблюдали на двух спутниках пульсации во время диполизации магнитосферы и нашли, что периоды в хвосте магнитосферы и на наземной станции совпали. Стоячая альвеновская волна с периодом 15 минут, выявленная на спутниках Cluster авторами [Zheng et al., 2006], сопровождалась на соответствующих наземных станциях пульсациями с тем же периодом, а пульсации на других спутниках на меньших L -оболочках и вблизи их проекций на землю в это же время имели более короткие периоды.

Теоретические исследования [Mann and Wright, 1995; Mann et al., 1997] показали, что в ази-

мутально неоднородной магнитосфере полоидальная мода со временем трансформируется в тороидальную. Правда, при расчетах предполагались большие азимутальные числа пульсаций, что для $Pc5$ не является характерным. Sarris et al. [2009] представили один случай измерения $Pc5$ на GOES-8, вроде бы подтверждающий такую трансформацию.

Изучение закономерностей поведения $Pc5$ в зависимости от моды волны, полоидальной или тороидальной, было проведено в работах [Eriksson et al., 2005, 2006, 2008] по данным спутников Cluster; изучались азимутальные числа пульсаций, поляризация, направление распространения. Clausen and Yeoman [2009] из регистрируемых на тех же спутниках Cluster магнитных пульсаций $Pc5$ выделяли магнитозвуковую, полоидальную и тороидальную составляющие. Число появления полоидальных колебаний там оказалось выше, чем тороидальных, а частоты мод не всегда совпадали.

Целью данной работы является изучение зависимости интенсивности наблюдаемых на Земле пульсаций $Pc5$ от моды колебаний в магнитосфере на соответствующей силовой линии.

2. ДАННЫЕ

С этой целью мы сравнили одновременные записи пульсаций $Pc5$ на геостационарном спутнике GOES-8 и на канадской обс. Poste-de-la-Baleine, (PBQ), географические координаты которой $\varphi =$

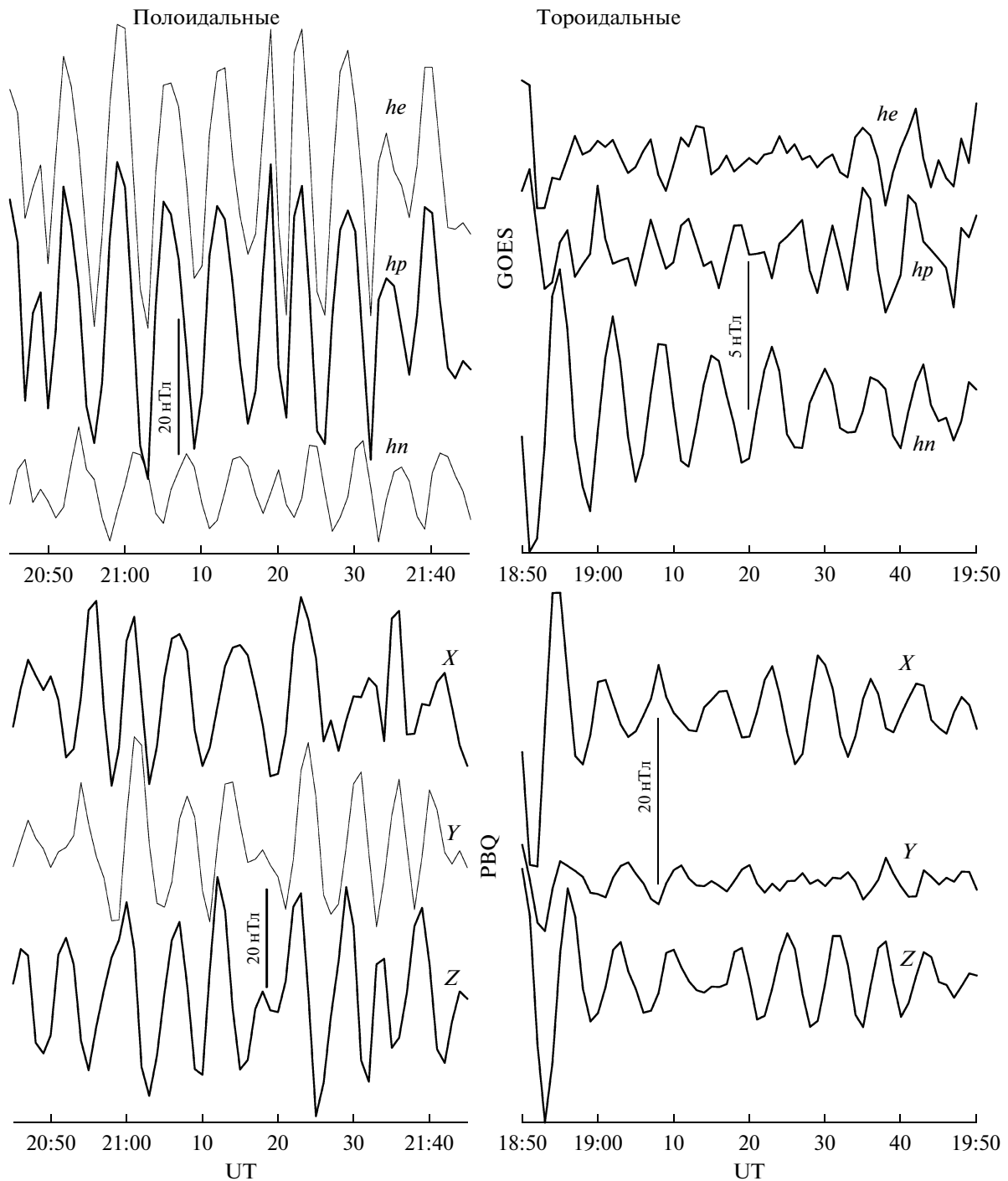


Рис. 1. Вверху: примеры полоидальных колебаний на GOES-8 30 сентября 2001 г. (слева) и тороидальных 6 февраля 2001 (справа). Под ними показаны одновременные пульсации в обл. PBQ.

$= 55.3^\circ$, $\lambda = 282.2^\circ$, а исправленные геомагнитные $\Phi = 65.6^\circ$, $\Lambda = 358.6^\circ$. Проекция силовой линии спутника на землю находится вблизи точки с координатами $\phi = 56.8^\circ$, $\lambda = 282^\circ$ (см. рис. 4 в работе Kessel [2008]), что соответствует геомагнитным координатам $\Phi = 67^\circ$, $\Lambda = 358^\circ$. Одноминутные данные обоих магнитометров за весь 2001 г. были

пропущены через цифровой фильтр высоких частот с подавлением на уровне 0.7 колебаний с периодом более 13 мин, т.е. ниже диапазона $Pc5$. Было выбрано 36 интервалов с одной и той же длительностью 58 мин, когда на GOES-8 наблюдались пульсации. Они были разделены на полоидальные и тороидальные. Разделение проведено

по величине амплитуд компонент: если максимальной была азимутальная компонента hm , то колебания считались тороидальными, а если максимальными были he или hp , направленные соответственно к Земле или параллельно оси вращения Земли, то колебания считались полоидальными. Число тороидальных случаев оказалось 22, а полоидальных 14. Примеры двух мод показаны на верхних графиках рис. 1. Используемые в работе случаи представлены в таблице; день, месяц, начало и конец интервала даны в трех левых столбцах.

Для всех случаев на GOES-8 находилась частота колебаний каждой компоненты. Определение частоты из разложения Фурье для массива из 58 точек сопряжено с большими ошибками, поэтому использовалась аппроксимация пульсаций синусоидой посредством программы *curvefit* из программного обеспечения языка IDL. Она осуществляет нелинейную аппроксимацию массива данных задаваемой функцией с произвольным числом параметров; в качестве таковых брались частота, амплитуда, фаза и постоянная составляющая. Для каждого случая проводилось несколько аппроксимаций с разными начальными частотами: методом БПФ грубо определялась частота максимума спектра, а затем для аппроксимации брались найденная частота f_0 и $f_0 \pm f_0/2$. Если аппроксимации различались, то бралась с минимальным среднеквадратичным отклонением от исходного сигнала.

Заметим, что для определения частоты $Pc5$ Takahashi et al. [2002] использовали метод максимальной энтропии, а Kessel [2008] при решении той же задачи перед нахождением спектральной мощности применял окно Парзена для исходных данных.

Частоты в разных компонентах расходились в пределах ошибки аппроксимации, около 10%. Периоды и амплитуды для компоненты с максимальной амплитудой представлены в четвертом и пятом столбцах таблицы. Средний период тороидальных колебаний оказался равным 5.7 ± 1.1 мин, а полоидальных — 5.4 ± 1.0 мин, расхождение лежит в пределах погрешности.

Суточный ход частоты появления обеих мод по местному магнитному времени $MLT = UT-5$ приведен на рис. 2, на котором видно, что тороидальные колебания появляются чаще до магнитного полудня, а полоидальные — вблизи полудня и вечером. Похожее суточное распределение мод по данным спутника CRRES было найдено в работе [Hudson et al., 2004]; согласно измерениям на спутнике THEMIS Liu et al. [2009], в полуденном секторе доминирует полоидальная мода $Pc5$. Как видно на рис. 2, суточный ход выражен не вполне четко, случается и обратное появление мод. Особенностью этих случаев является значительная амплитуда другой моды: чисто тороидальные или

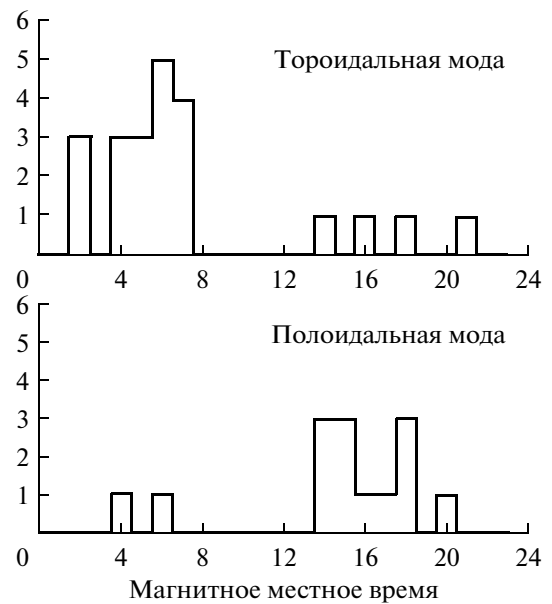


Рис. 2. Суточный ход частоты появления тороидальной (наверху) и полоидальной (внизу) мод на спутнике GOES-8 в 2001 г.

полоидальные колебания имеют место лишь в теории.

В работе [Baker et al., 2003] выполнен статистический анализ наземных геомагнитных пульсаций $Pc5$ за 10 лет непрерывного наблюдения на цепочке магнитометров CANOPUS, расположенной в авроральных широтах. Ближе всех к проекции силовой линии GOES-8 и obs. PBQ располагается obs. Gillam. На этой и других станциях в суточном ходе четко прослеживаются два максимума, утренний 05–08 MLT и послеполуденный 13–18 MLT. Как видно на рис. 2, первый совпадает с тороидальными колебаниями на GOES'e, а второй с полоидальными.

Все выбранные нами случаи $Pc5$ пульсаций в магнитосфере на спутнике GOES-8 сопровождались и $Pc5$ пульсациями на Земле, в obs. PBQ. В случаях, приведенных на рис. 1, периоды на спутнике (вверху) и на Земле (внизу) совпадают, однако это наблюдается не всегда. На рисунке 3 показан случай, когда на GOES наблюдались интенсивные тороидальные колебания с периодом 7 мин, а на Земле период был примерно в два раза больше.

Другой пример приведен на рис. 4: полоидальные колебания с периодом 4 мин на спутнике сопровождались 10-мин колебаниями на Земле. На нижних панелях этих рисунков представлены спектры пульсаций для самой интенсивной компоненты на GOES и для X -компоненты в PBQ. Если для тороидального колебания на рис. 3 видно наличие общего пика на 2.5 мГц (6.7 мин), то для полоидального (рис. 4) спектры совершенно

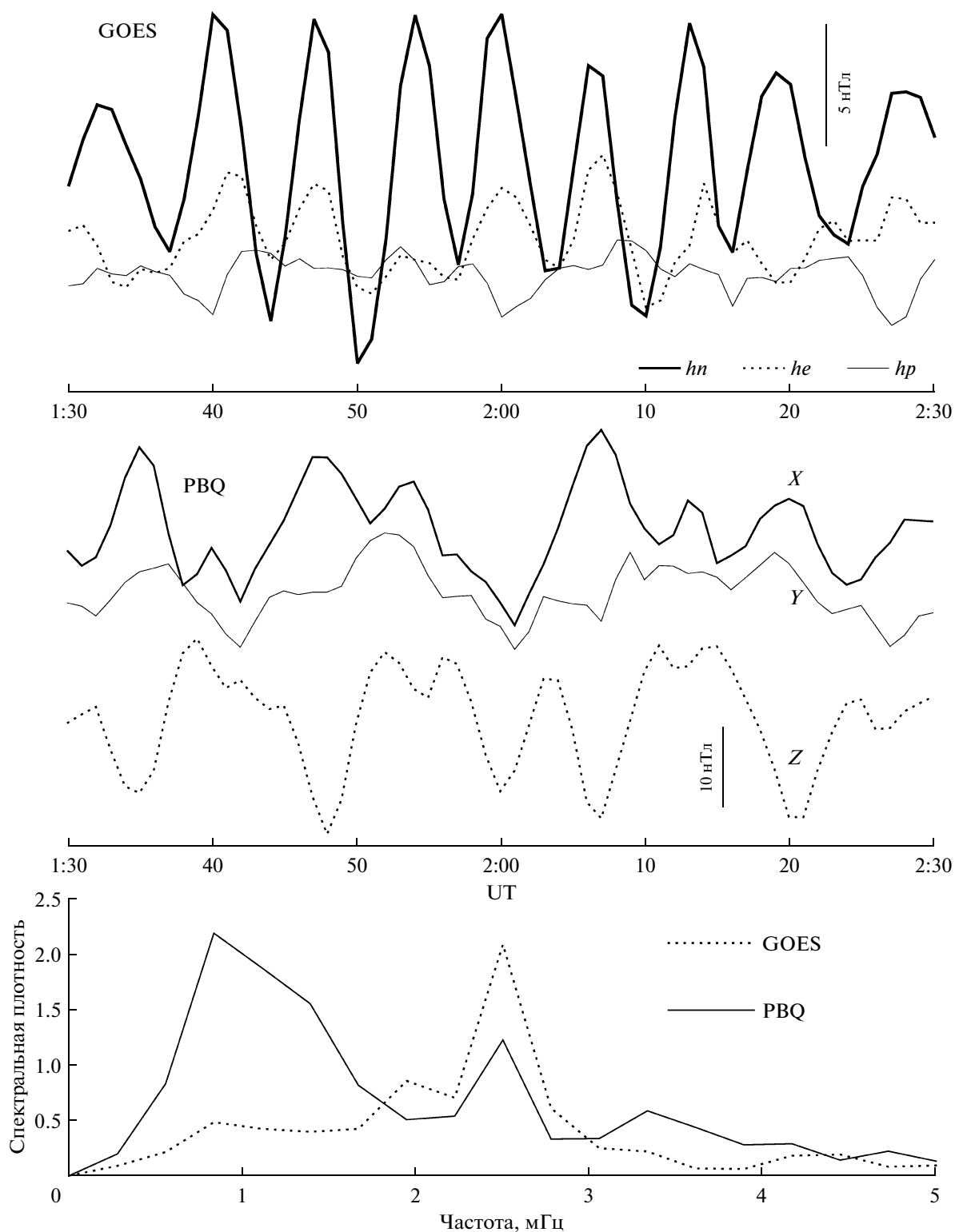


Рис. 3. Геомагнитные пульсации на GOES-8 (наверху), в obs. PBQ (посередине) и их спектры для случая 9 апреля 2001 г.

различны. Похожая закономерность имеет место и для других случаев: из 22 случаев тороидальной моды только в 6 случаях спектры различаются, а из 14 полоидальных спектры различны в 10 случа-

ях. Зависимости подобия спектров от местного времени не обнаружено.

Пульсации на Земле вызываются соответствующими процессами в магнитосфере, поэтому

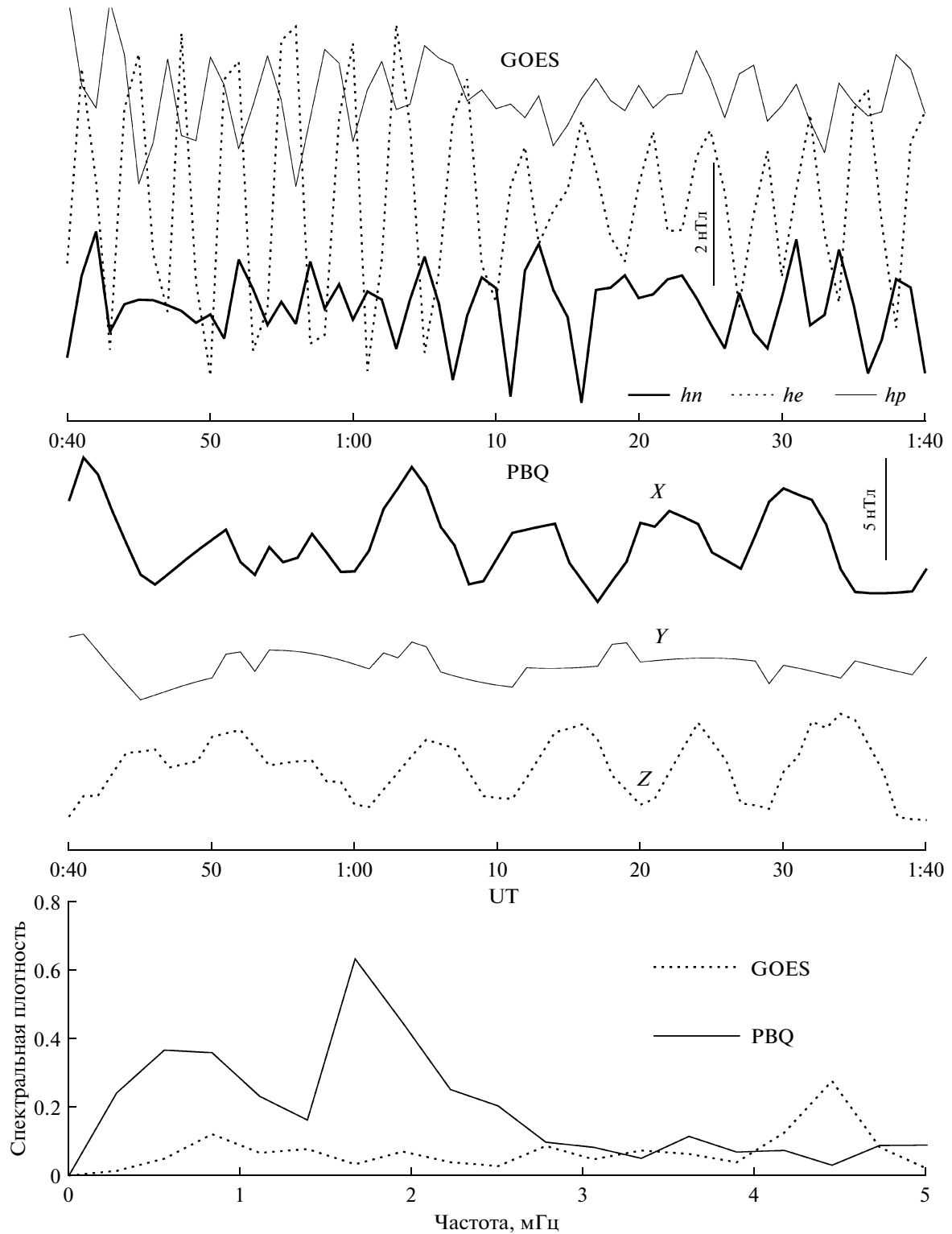


Рис. 4. Геомагнитные пульсации на GOES-8 (наверху), в обс. PBQ (посредине) и их спектры для случая 19 сентября 2001 г.

найденная на спутнике частота была выделена во всех магнитных компонентах в обс. PBQ посредством той же программы *curvefit*; неопределенны-

ми параметрами задавались амплитуда, фаза и постоянная составляющая. Амплитуда этой частоты, наибольшая из горизонтальных компонент в

Параметры использованных случаев *Рс5*. (Пояснения в тексте.)

ДД ММ	Начало	Конец	T мин	A GOES	A PБQ	Comp	Dst	Ap
Полоидальные								
23.01	22:48–23:46		4.9	11.8	4.3	X	–8	27
31.01	19:12–20:10		6.6	2.5	1.6	X	–33	27
18.02	19:12–20:10		4.1	4.1	0.2	X	–7	3
3.03	21:43–22:41		4.0	1.2	0.7	X	–9	12
18.04	8:38–9:36		6.8	1.9	3.2	X	–88	111
19.09	0:43–1:41		4.0	1.5	0.2	X	–3	15
29.09	19:41–20:38		4.1	3.2	6.8	Y	–47	39
30.09	20:46–21:43		5.9	13.7	8.6	Y	–64	48
22.10	18:50–19:48		5.0	10.1	7.6	Y	–137	132
25.10	22:26–23:24		6.2	2.2	1.2	Y	–31	7
28.10	19:34–20:31		6.7	4.8	3.3	Y	–102	27
12.12	19:34–20:31		5.5	1.3	1.5	Y	–19	15
29.12	10:34–11:31		5.4	4.0	3.1	X	+74	12
29.12	22:34–23:31		6.1	5.4	1.0	Y	+32	12
Средние			5.4	4.8	3.1		–31	35
Тороидальные								
6.02	18:43–19:41		7.0	2.3	6.3	X	–10	15
13.02	11:31–12:29		6.3	1.9	18.6	X	–17	15
29.03	9:22–10:19		4.7	4.0	10.7	X	–30	22
30.03	21:07–22:05		4.8	2.4	5.0	X	+2	18
1.04	7:12–8:10		7.5	3.4	16.8	X	–157	56
9.04	1:34–2:31		6.6	4.3	2.6	X	–39	12
9.04	9:00–9:58		4.7	2.5	14.8	X	–43	18
14.04	10:34–11:31		4.9	1.2	13.6	X	–12	18
29.04	6:58–7:55		5.6	0.8	5.5	X	–2	12
2.06	11:31–12:29		5.0	1.6	11.3	X	0	27
9.06	10:41–11:38		5.1	1.4	3.1	X	+8	18
20.06	10:41–11:38		4.8	1.1	2.7	X	–12	19
31.07	9:43–10:41		5.1	2.4	1.4	X	–16	12
13.08	12:00–12:58		4.5	0.9	2.1	X	–12	15
18.08	6:43–7:41		8.4	3.6	2.0	X	–50	18
3.09	12:07–13:05		4.3	0.8	0.7	Y	–9	18
15.09	8:38–9:36		5.9	4.9	5.1	X	+3	22
23.09	23:02–0:00		5.0	3.9	10.9	X	–35	32
29.10	10:19–11:17		6.2	1.3	5.8	X	–58	39
16.12	9:00–9:58		6.6	2.3	7.0	X	+8	9
24.12	11:02–12:00		6.6	3.7	32.5	X	–34	32
30.12	9:22–10:19		6.5	1.6	6.8	X	–16	7
Средние			5.7	2.4	8.4		–23	21

PBQ, представлена в таблице в шестом столбце. В случаях несовпадения периодов на спутнике и на земле найденная таким образом величина гармоники, естественно, меньше реально наблюдаемой амплитуды. В седьмом столбце указано, какая из горизонтальных компонент максимальна: X — вдоль географического меридиана, Y — вдоль параллели. Как видно из таблицы, при тороидальных колебаниях из горизонтальных компонент наибольшая почти всегда X , лишь для случая 3 сентября Y превышала X , а для полоидальных X и Y разделились поровну.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Мы сопоставили полученные вышеуказанным способом амплитуды гармоник пульсаций на спутнике и на земле. На рисунке 5 представлено соотношение величин полных компонент всех выбранных нами пульсаций; по горизонтальной оси отложены амплитуды на GOES-8, по вертикальной — амплитуды в obs. PBQ для той же частоты, что и на GOES. Зачерненными кружками показаны величины данные для полоидальной моды, светлыми — для тороидальной. Видно резкое различие между модами: у полоидальных колебаний небольшая амплитуда на Земле и большая в магнитосфере, у тороидальных — наоборот. Как видно из шестого столбца таблицы, для полоидальной моды на земле число случаев, когда максимальна X -компонента, примерно такое же, как и для Y -компоненты, для тороидальной же моды превышение амплитуды Y -компоненты над X -компонентой имеет место лишь в одном случае.

В двух последних столбцах таблицы даны индексы магнитной возмущенности для интервалов времени, когда наблюдались пульсации: Dst , определяющей интенсивность кольцевого тока, и Ap , характеризующий планетарную возмущенность. Для обоих индексов тороидальная мода появляется при несколько меньшей возмущенности, чем полоидальная, но расхождение лежит в пределах среднеквадратичного отклонения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Уже указывалось, что преобладание тороидальной моды на GOES-8 не является абсолютным, всегда присутствует и полоидальная составляющая, см. рис. 1 и 3. Спутник располагается не на вершине магнитной силовой линии, а к северу от нее на несколько градусов, поэтому даже и при чисто тороидальных колебаниях в магнитосфере на спутнике будут регистрироваться также компоненты he и hp , относимые в данном исследовании к полоидальной моде. Как видно из экспериментальных и теоретических данных работы [Zolotukhina et al., 2008], во временном ходе развития

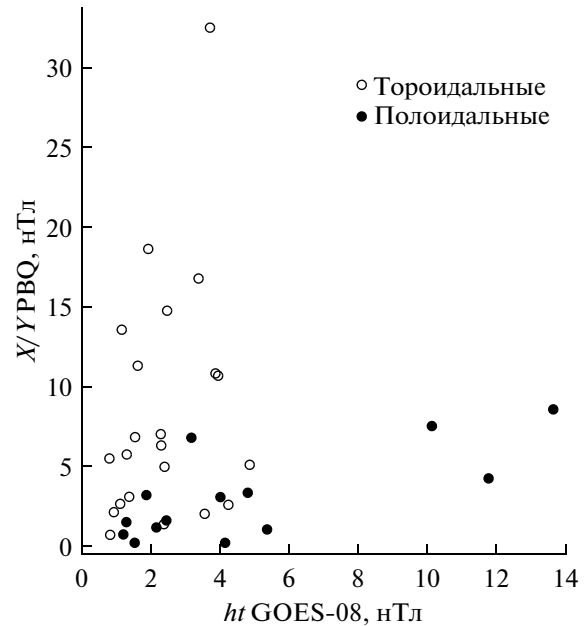


Рис. 5. Соотношение между магнитудами $Pc5$ на GOES-8 и в obs. PBQ в зависимости от моды колебаний.

пульсаций во время суббури тороидальная и полоидальная моды могут переходить друг в друга вследствие дрейфа энергичных частиц.

Авторы [Baker et al., 2003] по данным наземной сети смогли разделить пульсации $Pc5$ на вызванные резонансом силовых линий ($FLRs$) и $non-FLRs$: у пульсаций $FLRs$ единичный максимум и обращение фазы вдоль меридиана, а у пульсаций $non-FLRs$ этого нет. Найденные по этим критериям пульсации $FLRs$ авторы отождествляют с тороидальной модой в магнитосфере, а пульсации $non-FLRs$ — с полоидальной. Преимущественная тороидальность утренних пульсаций на рис. 2 хорошо согласуется с данными работы [Baker et al., 2003], где утренний максимум $Pc5$ связывается с $FLRs$ и тороидальными колебаниями.

Отмеченное выше встречающееся иногда двукратное превышение периода пульсаций на Земле периода на спутнике, см. рис. 3 и 4, можно связать с обнаруженным Higuchi et al., [1986] на GOES-2 и -3 явлением, когда частота $Pc5$ в компоненте сжатия hp в два раза превышала частоту в радиальной компоненте he и в азимутальной hn . Авторы объяснили этот эффект диамагнетизмом горячей плазмы в поле волны при наличии неоднородностей плотности плазмы. Определяющей для наблюдаемых на Земле пульсаций является тороидальная составляющая в магнитосфере, определяемая hn -компонентой, поэтому в случаях двукратного расхождения частот hp и hn в магнитосфере, подобных отмеченным Higuchi et al., [1986], на поверхности будет регистрироваться низкая частота, как и наблюдается на рис. 3 и 4.

5. СВЯЗЬ С ВЫСЫПАНИЕМ ЧАСТИЦ

В работах Roldugin and Roldugin [2008] и Ролдугин и Ролдугин [2010] утверждается, что наблюдаемые на Земле геомагнитные пульсации $Pc5$, как и других типов, всегда связаны с авроральным высыпанием частиц. Если это так, то из результатов данного исследования следует, что высыпание пульсирующих частиц с периодами $Pc5$ из магнитосферы происходит при тороидальной моде. Данное обстоятельство, однако, имеет и другую сторону.

Манифестацией авроральных высыпаний являются сияния. Дуги сияний линейно вытянуты, в основном, в азимутальном, а не меридиональном направлении. Если продольные токи вдоль силовых линий совпадают с сияниями, то при расположении токов вдоль широты они создадут в магнитосфере магнитное поле с преимущественной азимутальной компонентой, и в случае пульсирующего сияния колебания в магнитосфере будут тороидальными с небольшими азимутальными числами, так как сияния простираются на сотню градусов.

Eriksson et al. [2005] описали три случая полоидальных колебаний $Pc5$ по данным спутников Cluster, и все колебания имели большие азимутальные числа, $m \approx 100$. Для колебаний $Pc4$ Eriksson et al. [2006] получили также большие азимутальные числа при полоидальной моде. Тороидальные же $Pc5$, измеренные Eriksson et al. [2008] также на Cluster, обнаружили небольшие азимутальные числа, $m \approx 3$. Отмеченный выше факт, что для тороидальных колебаний на Земле почти всегда максимальна X -компонента, а для полоидальных случаи с максимумами амплитуд пульсаций в X и Y примерно равны, хорошо согласуется с разницей в азимутальных числах для этих мод в магнитосфере.

Преобладание северо-южной компоненты на земле для азимутальных колебаний в магнитосфере при волновом рассмотрении пульсаций можно бы объяснить поворотом поляризации из-за холловских токов, см., например, Pilipenko [1990]. Однако магнитное поле на Земле для пульсаций естественнее рассматривать с квазистационарной точки зрения [Roldugin and Roldugin, 2008] как вполне определяемое из закона Био-Савара для трехмерной токовой системы, т.к. токи смещения в уравнении Максвелла для пульсаций малы по сравнению с токами зарядов.

Для обычных авроральных магнитных бухт северо-южная H -компонента как правило больше восточно-западной D -компоненты, и поскольку сияния с авроральными пульсациями $Pc5$ от неппульсирующих принципиально не отличаются, то и пульсирующая токовая система не отличается от токов $DP2$, см., например, [Motoba et al., 2002]. Проводимость ионосферы при вторжении

авроральных частиц с энергиями 0.5–10 кэВ становится неоднородной, и токи в западном или восточном электроджете определяются не только холловской, но и проводимостью Каулинга [Мишин и др., 2008], что делает модель поворота поляризации токами Холла малопродуктивной.

Известно [Tan et al., 2004, Liu et al., 1999], что радиальная электрическая компонента тороидальных пульсаций может вызвать ускорение электронов до релятивистских энергий. Поэтому вопрос о том, является ли тороидальность колебаний причиной высыпания, или же само высыпание при пульсациях $Pc5$ создает сильную азимутальную в магнитосфере компоненту, является открытым.

6. ВЫВОДЫ

Сопоставление пульсаций на GOES-8 и PBQ позволяет сделать выводы:

1) пульсации $Pc5$ в магнитосфере и на Земле вблизи силовой линии появляются одновременно, но могут иметь различные периоды;

2) тороидальные пульсации появляются преимущественно в утренние часы, полоидальные — чаще в вечерние;

3) у полоидальных колебаний полная амплитуда большая в магнитосфере, но малая на Земле, у тороидальных — наоборот;

4) высыпание авроральных частиц происходит при тороидальной моде $Pc5$.

Автор благодарен сайту <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>, откуда были получены магнитные данные GOES-8 и обсерватории Poste-de-la-Baleine (PBQ).

Работа поддержана РФФИ грант № 12.05.00273а и Программой Президиума РАН № 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мишин В.М., Сапронова Л.А., Базаржапов А.Д., Кузьминых Ю.В. Роль токов Каулинга и Холла в формировании западной авроральной электроструктуры // Солнечноземная физика. Т. 1. Вып. 12. С. 161–162. 2008.
- Ролдугин В.К., Ролдугин А.В. Связь авроральных и геомагнитных пульсаций в полярных широтах по данным наблюдений на Шпицбергене // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 5. С. 634–643. 2010.
- Baker G., Donovan E.F., Jackel B.J. A comprehensive survey of auroral latitude $Pc5$ pulsation characteristics // J. Geophys. Res. V. 108. № A10. doi:10.1029/2002JA009801. 2003.
- Clausen L.B.N., Yeoman T.K. Comprehensive survey of $Pc4$ and $Pc5$ band spectral content in Cluster magnetic field data // Ann. Geophys. V. 27. № 8. P. 3237–3248. 2009.
- Eriksson P.T.I., Blomberg L.G., Walker A.D.M., Glassmeier K.-H. Poloidal ULF oscillations in the dayside mag-

- netosphere: a Cluster study // *Ann. Geophys.* V. 23. № 7. P. 2679–2686. 2005.
- Eriksson P.T.I., Blomberg L.G., Schaefer S., Glassmeier K.-H. On the excitation of ULF waves by solar wind pressure enhancements // *Ann. Geophys.* V. 24. № 11. P. 3161–3172. 2006.
- Eriksson P.T.I., Blomberg L.G., Schaefer S., Glassmeier K.-H. Sunward propagating *Pc5* waves observed on the post-midnight magnetospheric flank // *Ann. Geophys.* V. 26. № 6. P. 1567–1579. 2008.
- Higuchi T., Kokuhun S., Ohtani S. Harmonic structure of compressional *Pc5* pulsations at synchronous orbit // *Geophys. Res. Letters.* V. 13. № 11. P. 1101–1104. 1986.
- Hudson M.K., Denton R.E., Lessard M.R., Miftakhova E.G., Anderson R.R. A study of *Pc-5* ULF oscillations // *Ann. Geophys.* V. 22. № 1. P. 289–302. 2004.
- Kessel R.L. Solar wind excitation of *Pc5* fluctuations in the magnetosphere and on the ground // *J. Geophys. Res.* V. 113. A04202. doi:10.1029/2007JA012255. 2008.
- Liu W.W., Rostoker G., Baker D.N. Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF pulsations // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A8. P. 17391–17407. 1999.
- Liu W.W., Sarris T.E., Li X., Elkington S.R., Ergun R., Angelopoulos V., Bonnell J., Glassmeier K.-H. Electric and magnetic field observations of *Pc4* and *Pc5* pulsations in the inner magnetosphere: A statistical study // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12206. doi:10.1029/2009JA014243. 2009.
- Mann I.R., Wright A.N. Finite lifetimes of ideal poloidal Alfvén waves // *J. Geophys. Res.* V. 100. № A12. P. 23677–23686. doi:10.1029/95JA02689. 1995.
- Mann L.R., Wright A.N., Hood A.W. Multiple-timescales analysis of ideal poloidal Alfvén waves // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A2. P. 2381–2390. doi:10.1029/96JA03034. 1997.
- Motoba T.T., Kikuchi T., Luhr H., Tachihara H., Kitamura T.-I., Hayashi K., Okuzawa T. Global *Pc5* caused by a DP2-type ionospheric current system // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A2. P. 1032. doi:10.1029/2001JA900156. 2002.
- Pilipenko V.A. ULF waves on the ground and in space // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 52. № 12. P. 1193–1209. 1990.
- Roldugin V.C., Roldugin A.V. *Pc5* pulsations on the ground, in the magnetosphere, and in the electron precipitation: Event of 19 January 2005 // *J. Geophys. Res.* V. 113, № A04222. doi:10.1029/2007JA012553. 2008.
- Sarris T.E., Wright A.N., Li X. Observations and analysis of Alfvén wave phase mixing in the Earth’s magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 114. A03218. doi:10.1029/2008JA013606. 2009.
- Tan L.C., Fung S.F., Chao X. Observation of magnetospheric relativistic electrons accelerated by *Pc-5* ULF waves // *Geophys. Res. Letters.* V. 31. L14802. doi:10.1029/2004GL019459. 2004.
- Takahashi K., Denton R.E., Gallagher D.L. Toroidal wave frequency at $L = 6–10$: Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers /CCE observation and comparison with theoretical model // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A2. 1020. doi:10.1029/2001JA000197. 2002.
- Volwerk M., Zhang T.L., Nakamura R., Runov A., Baumjohann W., Glassmeier K.-H., Takada T., Eichelberger H.U., Carr C.M., Balogh A., Klecker B., Réme H. Plasma flow channels with ULF waves observed by Cluster and Double Star // *Ann. Geophys.* V. 23. № 8. P. 2929–2935. 2005.
- Zheng Y., Lui A.T.Y., Mann I.R., Takahashi K., Watermann J., Chen S.-H., Rae I.J., Mukai T., Russel C.T., Balogh A., Pfaff R.F., Réme H. Coordinated observation of field line resonance in the mid-tail // *Ann. Geophys.* V. 24. № 2. P. 707–723. 2006.
- Zhu X., Kivelson M.G. Compressional ULF waves in the outer magnetosphere, 1, Statistical study // *J. Geophys. Res.* V. 96. № 11. P. 19451–19467. 1991.
- Zolotukhina N.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. *Pc5* waves generated by substorm injection: a case study // *Ann. Geophys.* V. 26. № 7. P. 2053–2059. 2008.