

УДК 523.62.726

ВОЗБУЖДЕНИЕ $Pc5$ ПУЛЬСАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ ЧАСТИЦ НА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ФАЗЕ МАГНИТНОЙ БУРИ 31 ОКТЯБРЯ 2003 г.

© 2011 г. В. Б. Белаховский¹, В. А. Пилипенко²

¹Учреждение РАН Полярный Геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Учреждение РАН Институт физики Земли, Москва
e-mail: belakhovsky@mail.ru; pilipenko_va@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2009 г.

После доработки 21.01.2011 г.

Детально рассмотрена пространственная структура интенсивных $Pc5$ пульсаций геомагнитного поля и риометрического поглощения на восстановительной фазе сильной магнитной бури 31.10.2003 г. Глобальная структура возмущений анализировалась с помощью мировой сети магнитометров и риометров, дополненных данными магнитометров и детекторов частиц на геостационарных спутниках GOES и LANL. Локальная пространственная структура исследовалась по данным региональной сети финских вертикальных риометров и станций магнитной сети IMAGE. Несмотря на общее подобие и близкий частотный состав квазипериодических вариаций магнитного поля и риометрического поглощения, их пространственная локальная структура оказывается различной, что ставит под сомнение представления о пульсациях риометрического поглощения как чисто модуляционном процессе. Предложено, что наблюдаемые вариации являются осцилляциями двух связанных систем: магнитосферного МГД волновода/резонатора и системы циклотронные шумы + электроны. Геомагнитные $Pc5$ колебания на восстановительной фазе сильной магнитной бури являются предположительно результатом возбуждения магнитосферного волновода на флангах магнитосферы. Анализ фазовых скоростей азимутального распространения показывает, что они определяются не скоростью солнечного ветра, а внутримангитосферными параметрами. Мангитосферный волновод оказывается в метастабильном состоянии при высоких скоростях солнечного ветра, и квазипериодические флуктуации его давления стимулируют возбуждение волновода.

1. ВВЕДЕНИЕ: ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ $Pc5$ ПУЛЬСАЦИЙ

Геомагнитные УНЧ (ультранизкочастотные, или ultra low frequency, по западной терминологии) $Pc5$ колебания (характерные периоды ~ нескольких мин) являются неизменным компонентом возмущенной магнитосферы (см. обширную библиографию в обзоре [Пилипенко, 2002]). Традиционно считается, что основным источником $Pc5$ пульсаций в магнитосфере является неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (К-Г) границы магнитосферы, обтекаемой солнечным ветром [Kivelson and Pu, 1984]. Эти представления опираются на многократно подтвержденный факт сильного роста интенсивности $Pc5$ пульсаций с увеличением скорости солнечного ветра [Engebretson et al, 1998; Mathie and Mann, 2001]. Дополнительным источником $Pc5$ колебаний могут служить скачки или квазипериодические вариации давления солнечного ветра [Kessel, 2004]. Помимо этого, магнитосферные колебания того же диапазона эффективно возбуждаются потоками энергичных частиц с неравновесным распределением либо по энергии, либо по пространству [Похотелов и др., 1986]. Однако последние колебания имеют малые масштабы в поперечном направлении, и практиче-

ски полностью экранируются ионосферой от наземных магнитометров.

Интенсивные $Pc5$ колебания оказывают существенное влияние на динамику магнитосферных процессов: переносят энергию из пограничных слоев вглубь магнитосферы, ускоряют экваториальные [Elkington et al., 2003] и авроральные [Keiling et al., 2002] электроны. Кроме того, эти колебания могут эффективно модулировать потоки частиц кольцевого тока [Southwood and Kivelson, 1981]. По наземным наблюдениям эффекты модуляции могут проявиться при анализе синхронных наблюдений магнитного поля и риометрического поглощения [Olson et al., 1980; Posch et al., 1999]. Вариации риометрического поглощения (поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере) вызываются преимущественно высыпаниями энергичных электронов. УНЧ волны, регистрируемые наземными магнитометрами, не всегда сопровождаются пульсациями риометрического сигнала. Согласно обширной статистике по данным сети *CARISMA* [Spanwick et al., 2005] вероятность наблюдения пульсаций риометрического поглощения в тот же период, что и геомагнитных пульсаций, наиболее велика в утреннем секторе и резко зависит от широты, достигая максимальных значений ~70% на геомагнитной широте

Таблица 1. Координаты наземных станций

Станция	IAGA код	Геомаг. широта	Геомаг. долгота	MLT	Геомаг. полночь, UT	Вид наблюдений: M – магнитометр, R – риометр
Abisko	ABK	65.2	102.3	UT + 2.2	21:24	M, R (10 c)
Ivalo	IVA	65.0	109.8	UT + 2.1	20:56	M, R (10 c)
Sodankyla	SOD	63.8	107.7	UT + 2.6	21:02	M, R (10 c)
Oulu	OUL	61.0	106.6	UT + 2.5	21:06	M, R (10 c)
Hankasalmi	HAN	58.6	105.0	UT + 2.4	21:12	M (10 c)
Dombås	DOB	59.3	90.2	UT + 1.4	22:12	M (10 c)
Jyvaskyla	JYV	58.5	105.7	UT + 2.4	21:12	R (10 c)
Meanok	MEA	62.2	305.4	UT + 15.8	08:12	M (5 c)
Barrow	BRW	70.0	256.6	UT + 12.5	12:11	M (5 c)
Fort Smith	FSM	65.3	303.1	UT + 15.6	08:20	R (5 c)
Dawson	DAW	65.9	271.8	UT + 13.5	10:33	R (5 c)
Norilsk	NOR	64.6	162.2	UT + 6.2	17:56	M (10 c)
Tixie	TIX	65.8	197.0	UT + 8.5	16:04	M (10 c)
Chokurdakh	CHD	64.8	212.4	UT + 9.5	15:08	M (10 c)
Zyryanka	ZYK	59.8	217.0	UT + 9.9	14:50	M (10 c)
Narsarsuaq	NAQ	66.3	43.9	UT – 1.6	14:07	M (10 c)
Poste-De-La-Balein	PBQ	66.15	358.12	UT + 19.2	04:48	M (10 c)

~67°. Возможны (хотя и крайне редко) и обратные ситуации, когда риометрические пульсации не сопровождаются геомагнитными вариациями [Krishnaswamy and Rosenberg, 1987; Клейменова и др., 1997].

Наиболее общепризнан механизм модуляции УНЧ волнами потоков высыпавшихся электронов, предложенный Coroniti and Kennel [1970], согласно которому компонента сжатия b_{\parallel} магнитного поля волны модулирует инкремент нарастания электронно-циклотронных шумов, которые вызывают рассеяние электронов в конус потерь. Однако эта возможность, по-видимому, не является исчерпывающей, т.к. зачастую модулированное $Pc5$ высыпание наблюдалось для волн без заметной b_{\parallel} [Nose et al., 1998] или без фоновых электронно-циклотронных шумов [Raquette et al., 1994]. В авроральной области периодическое ускорение и высыпание электронов могут вызываться мелкомасштабными дисперсионными альвеновскими возмущениями, обладающими продольным электрическим полем E_{\parallel} [Stasiewicz et al., 2000], или модуляцией области ускорения авроральных частиц альвеновской волной [Fedorov et al., 2004].

На восстановительной фазе сильных магнитных бурь наблюдаются интенсивные $Pc5$ пульсации с амплитудой, превосходящей на порядок амплитуды

типичных $Pc5$. Эти аномальные колебания по терминологии [Trevioli, 1997; Potapov et al, 2006] следует отнести к глобальным $Pc5$ пульсациям, поскольку они одновременно наблюдаются и в утреннем, и вечернем секторах, в широком диапазоне широт, вплоть до магнитного экватора. Общая пространственно-временная динамика глобальных $Pc5$ пульсаций во время магнитных бурь 29–31.10.2003 г. была детально проанализирована в работах [Клейменова и Козырева, 2005а, 2005б, 2008; Potapov, 2006]. Являются ли глобальные пульсации физически подобными обычным $Pc5$ пульсациям, или они вызваны качественно иными волновыми процессами, четкого ответа пока не получено. Глобальные $Pc5$ пульсации могут иметь особое значение для динамики релятивистских электронов, т.к. их частоты близки к частотам магнитного дрейфа электронов с энергией несколько МэВ [Elkington et al., 2003]. Высокая интенсивность этих колебаний, занимаемый ими большой объем магнитосферы, наличие продольной магнитной компоненты – все эти факторы должны приводить к более заметному воздействию на релятивистские электроны (модуляции, радиальной диффузии и ускорению), чем обычные $Pc5$ пульсации.

Целью данной работы является исследование утренних и дневных глобальных $Pc5$ пульсаций гео-

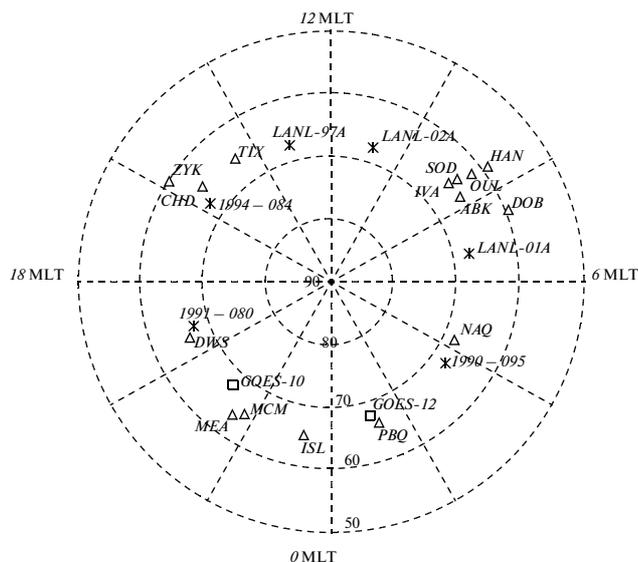


Рис. 1. Относительное положение наземных обсерваторий (треугольники) и геомагнитных проекций геостационарных спутников GOES (прямоугольники) и LANL (звездочки) в исправленных геомагнитных координатах для момента времени 05.00 UT 31 октября 2003 года.

магнитного поля на фазе восстановления сильной магнитной бури 31.10.2003: изучение их локальной пространственной структуры, связи с пульсациями риометрического поглощения и потоков энергичных магнитосферных частиц и с параметрами межпланетной среды. Полученные свойства колебаний могут дать новую информацию, необходимую для понимания физической природы глобальных $Pc5$ пульсаций и их воздействия на динамику магнитосферных частиц.

Таблица 2. Координаты геостационарных спутников

Спутник	Геомаг. долгота, град	MLT
1990-095	34.16	UT – 02.1
1991-080	266.79	UT – 10.3
1994-084	216.39	UT + 10.1
LANL-97A	175.27	UT + 06.8
LANL-01A	80.07	UT + 01.2
LANL-02A	141.01	UT + 04.1
GOES-10	296.4	UT – 09.6
GOES-12	356.5	UT – 05.0

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для характеристики межпланетного магнитного поля (ММП) и параметров солнечного ветра использованы данные спутника ACE (время распространения солнечного ветра до магнитопаузы ~ 26 мин). Спутник WIND в это время находился в хвосте магнитосферы с запаздыванием относительно магнитопаузы ~ 18 мин.

Для представления о глобальной наземной структуре магнитных возмущений использованы данные отдельных станций сетей *IMAGE*, *CARISMA/CANMOS*, *MAGDAS*, *Greenland Coastal Array*. Координаты станций и частоты дискретизации данных указаны в табл. 1, а относительное положение станций показано на рис. 1. Локальная структура возмущений исследуется по данным сети магнитных и риометрических станций в Скандинавии. Эта сеть позволяет сформировать следующие градиентные пары для определения эффектов распространения возмущений в широтном и долготном направлениях:

- Меридиональные (геомагнитная долгота $\Lambda \sim 107^\circ$) высокоширотная IVA-SOD (геомагнитные широты $\Phi \sim 64^\circ\text{--}65^\circ$) и низкоширотная OUL-HAN/JYV ($\Phi \sim 59^\circ\text{--}61^\circ$) пары;
- Азимутальные пары станций ABK-IVA ($\Phi \sim 65^\circ$), разнесенных по геомагнитной долготе на $\Delta\Lambda = 7.5^\circ$ (350 км), и DOB-HAN ($\Phi \sim 59^\circ$) на $\Delta\Lambda = 14.8^\circ$ (690 км);
- Разнесенные по долготе станции на вечернем фланге на $\Phi \sim 65^\circ$ DWS-MCM-ISL и TIX-CHD.

Наземные данные дополнены 1-минутными данными магнитных наблюдений на геостационарных спутниках серии GOES и наблюдениями потоков электронов и протонов разных энергий детектором *SOPA* на спутниках серии LANL (положение спутников указано в табл. 2 и на рис. 1). Fluxgate магнитометр на борту GOES измеряет с чувствительностью 0.2 нТл три компоненты магнитного поля Земли: H_r перпендикулярно плоскости орбиты, H_e по линии спутник-Земля, H_n перпендикулярно H_r и H_e , и направлено к востоку. Были также использованы данные по магнитному полю (3-с) и плазме (12-с) спутника GEOTAIL, проходившего в исследуемый период из хвоста магнитосферы в магнитослой через утренний фланг магнитосферы.

3. СОБЫТИЕ 31 ОКТЯБРЯ 2003 г.

В течение 29–30 октября 2003 г. произошли две экстремальные магнитные бури с интенсивностью $Dst \sim -400$ нТл, при которых скорость солнечного ветра V превысила 1000 км/с. Весь комплекс явлений космической погоды во время этих бурь рассмотрен в [Панасюк и др., 2004]. На фазе восстановления 31.10.2003 г. (день 304) произошли скачки плотности N солнечного ветра в ~ 05.30 UT и

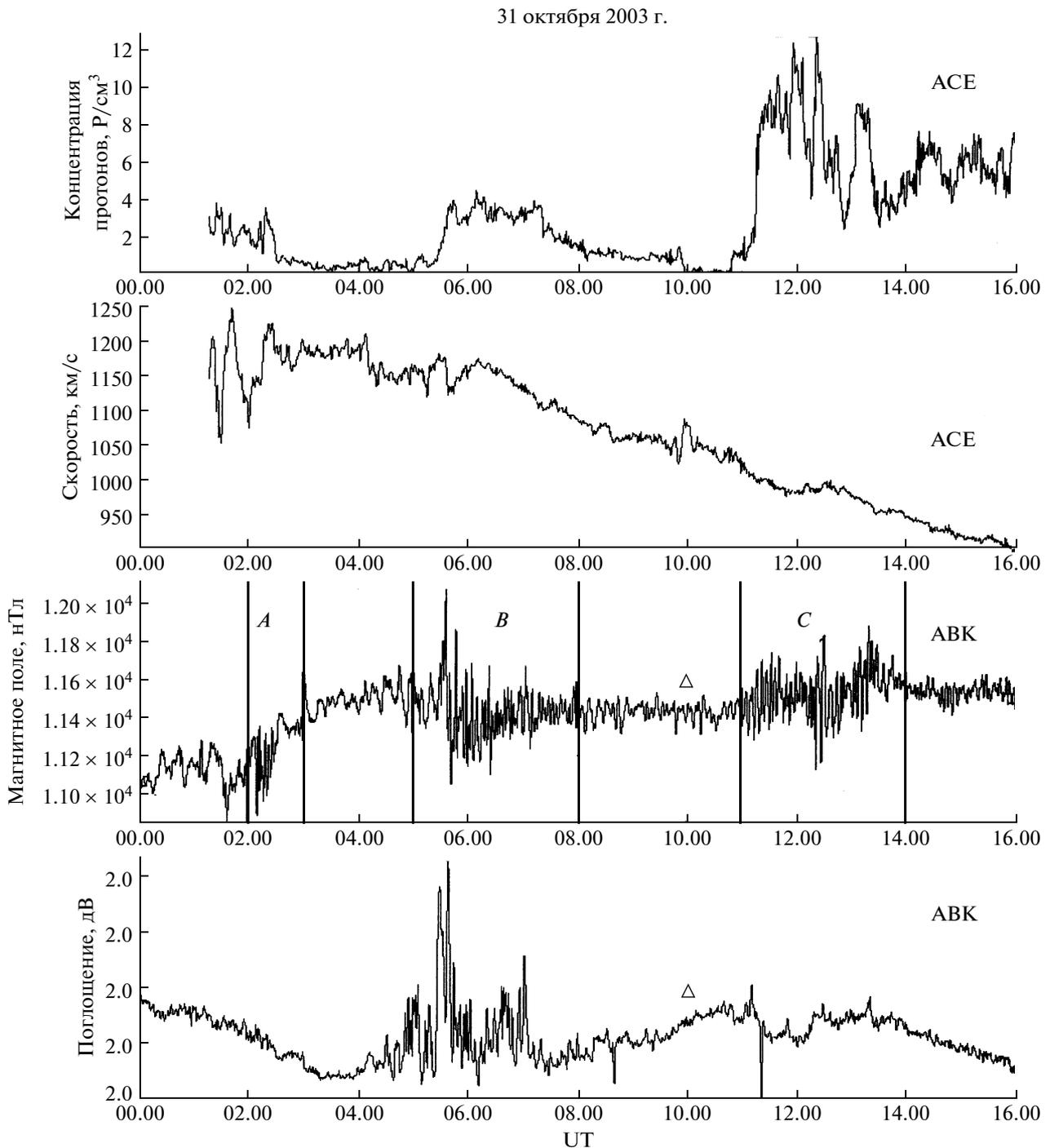


Рис. 2. Плотность протонов N и скорость солнечного ветра V по данным спутника ACE (с учетом сдвига на 21 мин), H -компонента и риометрическое поглощение на станции ABK в период 00.00–16.00 UT 31.10.2003 г. Треугольниками обозначен местный геомагнитный полдень.

~11.15 UT (рис. 2). До 01.30 UT данные ACE отсутствовали, но, судя по наблюдениям на спутнике WIND в хвосте магнитосферы, в ~01.30 UT произошел еще один резкий скачок N и V . Одновременно с этими скачками наблюдались глобальные всплески волновой активности в $Pc5$ диапазоне в следующих

интервалах: A (02.00–03.00 UT), B (05.00–08.00 UT), C (11.00–14.00 UT). Во время всех трех временных интервалов происходило усиление авроральной активности, характеризующейся AE индексом (рис. 3).

Появление $Pc5$ колебаний, особенно во время интервалов B и C , наблюдалось как на всем утреннем

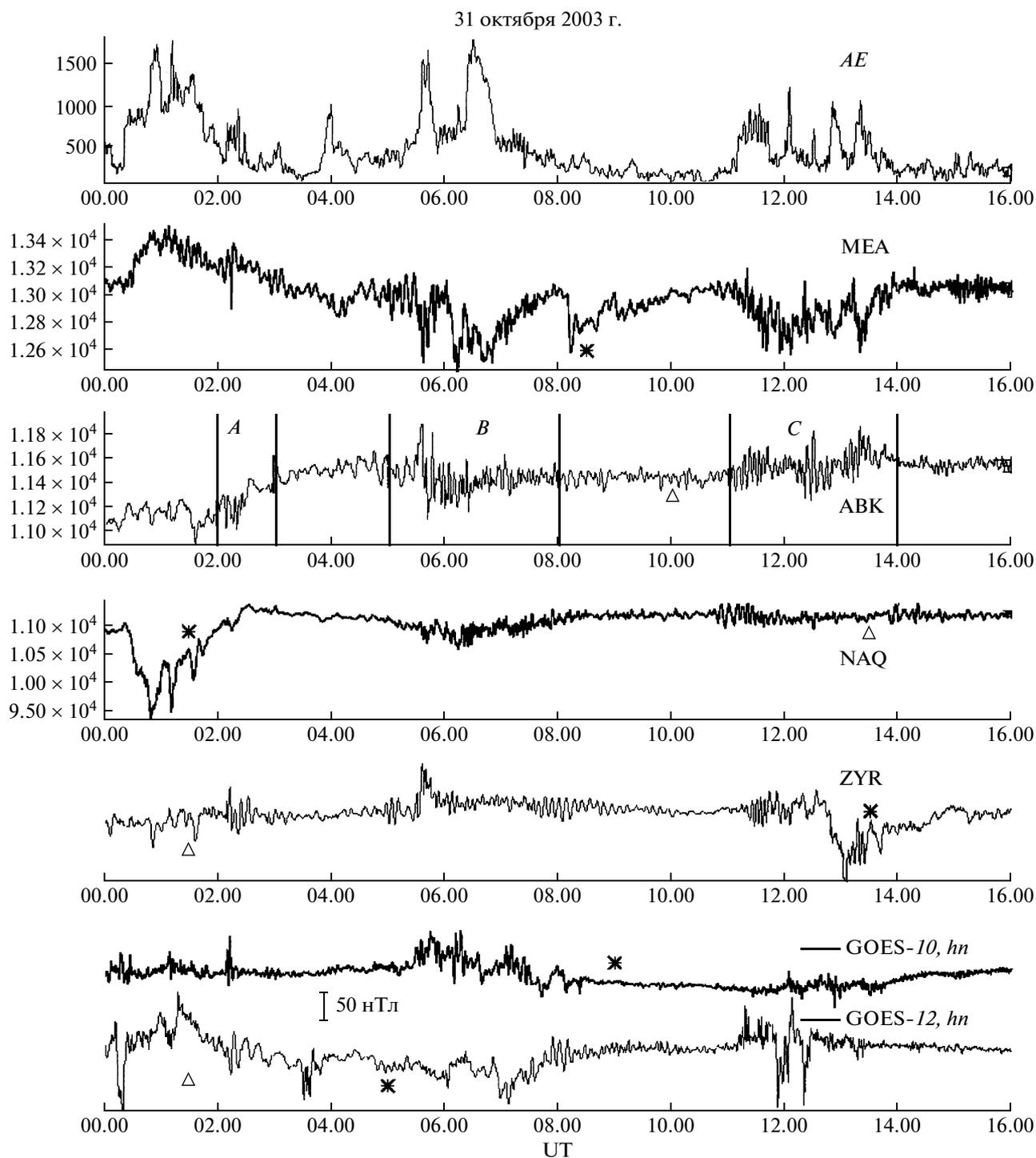


Рис. 3. AE-индекс, H -компонента магнитного поля в Канаде (MEA), Скандинавии (ABK), Гренландии (NAQ), и Восточной Сибири (ZYR), H_n -компонента магнитного поля на спутниках GOES-10 и GOES-12 в период 00.00–16.00 UT 31.10.2003 г. Треугольники обозначают время геомагнитного полудня, темные звездочки – полночи.

фланге магнитосферы, от ранних утренних часов до предполуденных (MEA, ABK, NAQ), так и на всем вечернем фланге, от послеполуденных часов до полуночных (ABK, ZYK, MEA, GOES) (рис. 3). Особенность интервала C состоит в том, что наиболее

интенсивные колебания с частотой ~ 3 мГц наблюдались не в утреннем секторе, а в полуденные и послеполуденные часы в очень широком диапазоне геомагнитных широт от $\sim 50^\circ$ до $\sim 70^\circ$ [Клейменова и Козырева, 2005a]. Профиль *IMAGE* во время интервала A

был в раннем утреннем секторе (04.00–05.00 MLT), во время интервала B – в предполуденные часы (07.00–10.00 MLT), а во время C – в послеполуденном секторе (13.00–16.00 MLT). Во время каждого из этих интервалов на станциях IMAGE наблюдались четкие $Pc5$ пульсации. Из сопоставления глобальной волновой активности и AE индекса (рис. 3) видна тенденция, отмеченная [Афанасьева, 1974; Samson and Rostoker, 1981; Клейменова и Козырева, 2005б] – возбуждению $Pc5$ пульсаций в утреннем секторе сопутствует развитие суббури или магнитной бухты в вечерние-ночные часы.

Утренние всплески $Pc5$ пульсаций (A , B) сопровождалась интенсивными осцилляциями риометрического поглощения, а послеполуденный (C) – уже нет, хотя средние уровни поглощения были примерно одинаковы (рис. 2). Во время интервала A всплеск риометрического поглощения происходит на широтах $\sim 58^\circ$ (JYV), а затем медленно сдвигается к более высоким широтам (OUL). Во время интервала B риометрическое поглощение сначала усиливается на широте $\sim 61^\circ$ (OUL), а затем усиливается и захватывает широты до $\sim 65^\circ$ (IVA, SOD), что соответствует общему развитию суббури и авроральной активности. Наблюдения на восточно-сибирских станциях [Соловьев и др., 2005] показали, что из нескольких всплесков $Pc5$ активности 31.10.2003 г. только один в ~ 21.00 UT, когда эти станции также находились в раннем утреннем секторе (~ 05.00 MLT), сопровождался усилением и квазипериодическими вариациями риометрического поглощения.

Далее мы детально рассмотрим локальную пространственную структуру осцилляций магнитного поля и риометрического поглощения в интервале B .

3.1. Локальная меридиональная структура колебаний. Рассмотрим интервал B (04.00–07.30 UT), когда наблюдались интенсивные, но нерегулярные, $Pc5$ пульсации как в магнитном поле (рис. 4), так и в риометрическом поглощении (рис. 5). Магнитные пульсации представляют собой последовательность нескольких волновых пакетов. Начало серии $Pc5$ в 05.30 UT, предваряется низкочастотными квазипериодическими вариациями в промежутке 04.20–05.15 UT с характерным периодом ~ 8 мин на средних широтах (OUL, HAN). Хотя $Pc5$ колебания довольно иррегулярны, в вейвлет-спектрах магнитных вариаций в 04.00–07.30 UT (рис. 6) явно видно преобладание двух характерных частот волновых пакетов: ~ 2.8 мГц и ~ 4.6 мГц (отмечены горизонтальной пунктирной линией). Вариации риометрического поглощения для того же промежутка времени еще менее регулярны и более широкополосные, частоты всплеска меняются от станции к станции от 1.5 до 4 мГц, без каких-либо отчетливых закономерностей изменения с широтой (не показаны).

Какого-либо закономерного смещения максимума спектральной плотности геомагнитных пульса-

ций с изменением широты не наблюдается. Однако отсутствие явных изменений центральной частоты с широтой не исключает наличия в пространственной структуре поля резонансных искажений, вызванных возбуждением альвеновских колебаний внешним источником в магнитосфере. С уверенностью об их наличии или отсутствии можно судить по меридиональному градиенту фазы колебаний [Baransky et al., 1995]. Градиентный анализ данных станций OUL-HAN (рис. 7) указывает на кажущееся распространение колебаний к полюсу, типичное для резонансной структуры. Разность фаз $\Delta\phi(f)$ имеет широкие минимумы на всех частотах в области спектральных максимумов пульсаций, указывающие на низкую добротность локального альвеновского отклика магнитосферы. Таким образом, градиентный анализ показывает, что на характерных частотах ~ 3.0 и ~ 4.6 мГц имеет место возбуждение локальных альвеновских колебаний в магнитосфере, но с низкой эффективностью.

Широтное распределение спектральных амплитуд и фаз вариаций риометрического поглощения даже для близких станций IVA-SOD не показывает какой-либо регулярной картины: нет близкого подобия на разнесенных по широте станциях, и наблюдаемые временные сдвиги между пиками колебаний довольно хаотичны. Коэффициенты кросс-корреляции крайне малы: в интервале B (05.10–07.00 UT) между IVA и SOD $R = 0.18$ при $\Delta t = 0$, а между IVA и OUL $R = 0.03$ при $\Delta t = 0$ с.

3.2. Синхронность пульсаций геомагнитного поля и риометрического поглощения. Вариации риометрического поглощения слабо подобны геомагнитным пульсациям, хотя частотный состав и тех, и других лежит в одном диапазоне $Pc5$. Наложение вариаций магнитного поля и риометрического поглощения на станции АВК (рис. 8) показывает, что они синхронизируются только в течение сравнительно коротких интервалов (1–2 периода), а потом подобие между ними пропадает. Кросс-корреляция, оцененная для всего интервала B (05.10–07.00 UT), имеет максимум при временных сдвигах ~ 50 с (АВК), ~ 90 с (IVA), ~ 50 с (OUL), показывающих опережение вариациями риометрического поглощения вариаций магнитного поля. Это опережение традиционно трактуется как указание на то, что модуляция происходит вблизи экваториальной плоскости магнитосферы, откуда энергичные электроны и МГД возмущения распространяются до ионосферы с разными скоростями.

3.3. Азимутальное распространение колебаний. Определение локальных скоростей распространения в азимутальном направлении проводилось на долготном профиле DOB-HAN, где пульсации магнитного поля имели наиболее гармонический вид (рис. 9). В серии пульсаций на интервале B (05.30–08.00 UT) выделяются 6 волновых пакетов. Спектральный анализ (рис. 6) показал, что в спектраль-

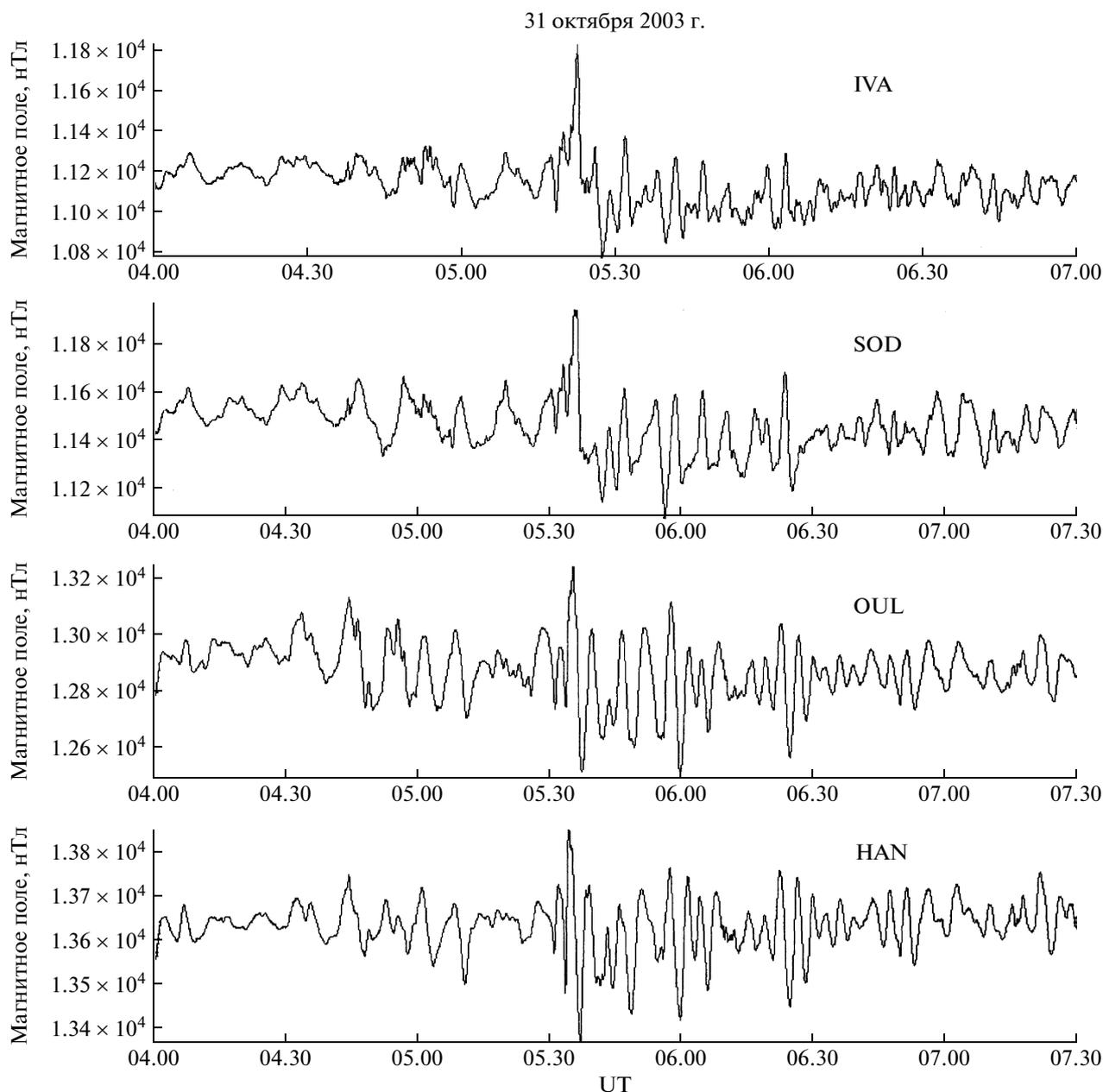


Рис. 4. $Pc5$ пульсации в магнитном поле (H -компонента) на меридиональном профиле IVA-SOD-OUL-HAN для интервала B (04.00–07.30 UT).

ном составе пульсаций преобладают частоты $f = 2.8$ мГц ($T \sim 360$ с) и $f = 4.6$ мГц ($T \sim 220$ с). После узкополосной фильтрации в полосах 340–370 с и 200–230 с, для каждого волнового пакета рассчитывался коэффициент кросс-корреляции $R(\Delta t)$. На $f = 4.6$ мГц получены устойчивые значения временных сдвигов $\Delta t = 10$ – 20 с при среднем $R \sim 0.42$, указывающие, что колебания распространяются в западном, т.е. в антисолнечном, направлении. На $f = 2.8$ мГц полученные значения Δt были менее устойчивы, и варьировались в пределах от $+20$ с до -40 с. Однако, если отбросить значения, соответствующие

тем субинтервалам, когда волновой пакет на этой частоте не проявлялся на вейвлет-сонограмме (рис. 9), то оставшиеся Δt имеют те же значения, что и на $f = 4.6$ мГц. Фазовые скорости $V_{ph} = \frac{\Delta \Lambda R_E \cos \Phi}{\Delta t}$ и азимутальные волновые числа $m = \frac{360 f [\text{Гц}] \Delta t}{\Delta \Lambda}$, оцененные по значениям временной задержки Δt , приведены на рис. 9. Оказывается, что разным волновым пакетами соответствуют, вообще говоря, разные фазовые скорости. Наблюдаемая разница скоростей

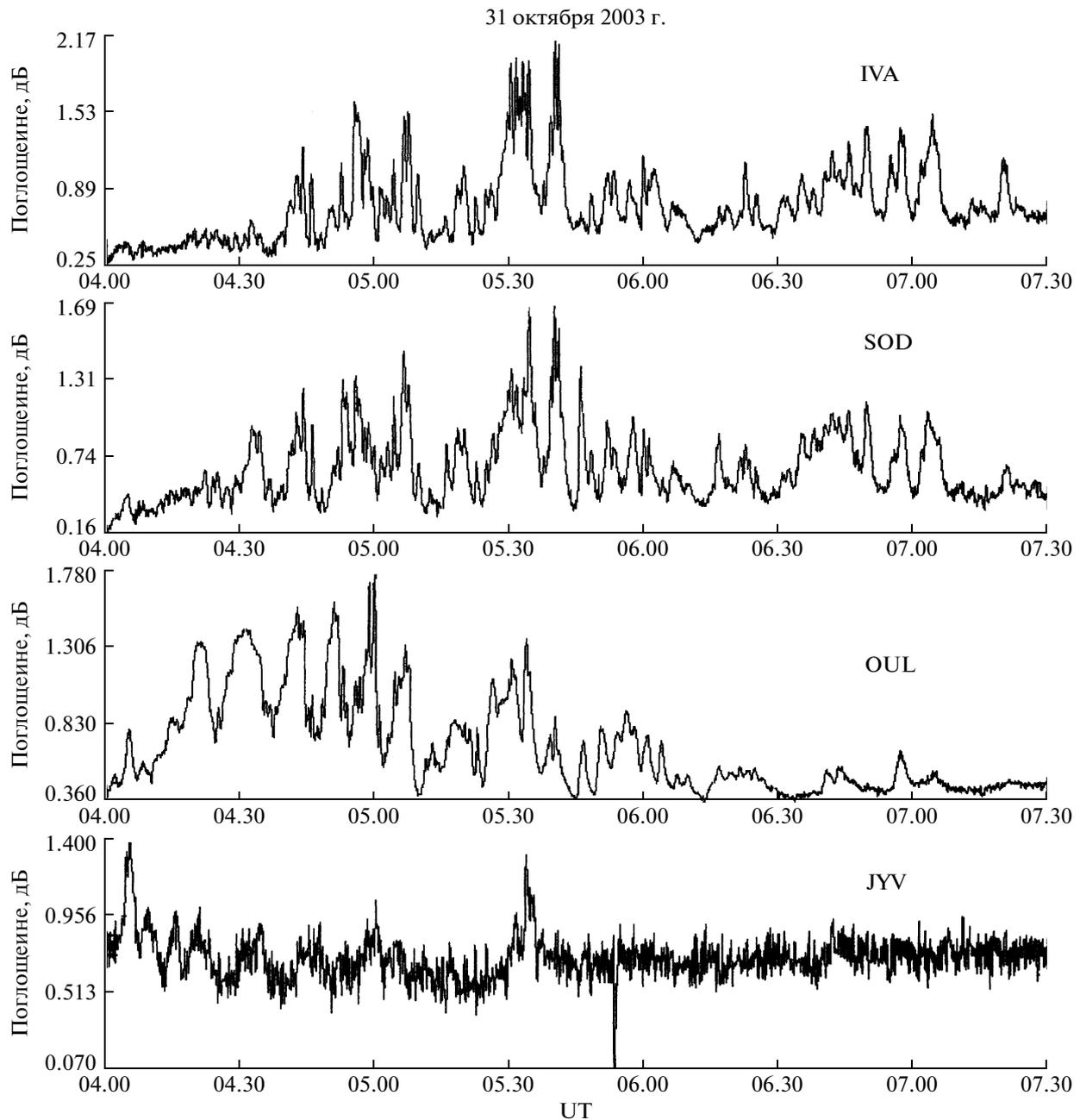


Рис. 5. $Pc5$ пульсации риометрического поглощения на меридиональном профиле IVA-SOD-OUL-JYV для интервала B (04.00–07.30 UT).

свидетельствует о том, азимутальная скорость колебаний не определяется скоростью солнечного ветра, которая в течение всего интервала менялась не более чем на 10% относительно 1000 км/с.

Фазовая скорость, оцененная для среднего значения временной задержки $\Delta t = 15$ с на $f = 4.6$ МГц, для интервала B составляет $V_{ph} \sim 50$ км/с. Это значение превышает скорости типичных $Pc5$ пульсаций $V_{ph} \sim 14$ км/с на субавроральных широтах [Olson and

Rostoker, 1978]. Среднее азимутальное фазовое число для интервала B составляет $m \sim 1.7$.

Вариации риометрического поглощения в $Pc5$ диапазоне, в целом, менее когерентны между разнесенными станциями по сравнению с магнитными сигналами. Для $Pc5$ вариаций риометрического поглощения регулярной картины азимутального распространения между IVA и АВК не наблюдается, характерны как отрицательные, так и положительные задержки по времени, с большими разбросами по

31 октября 2003 г. Магнитное поле

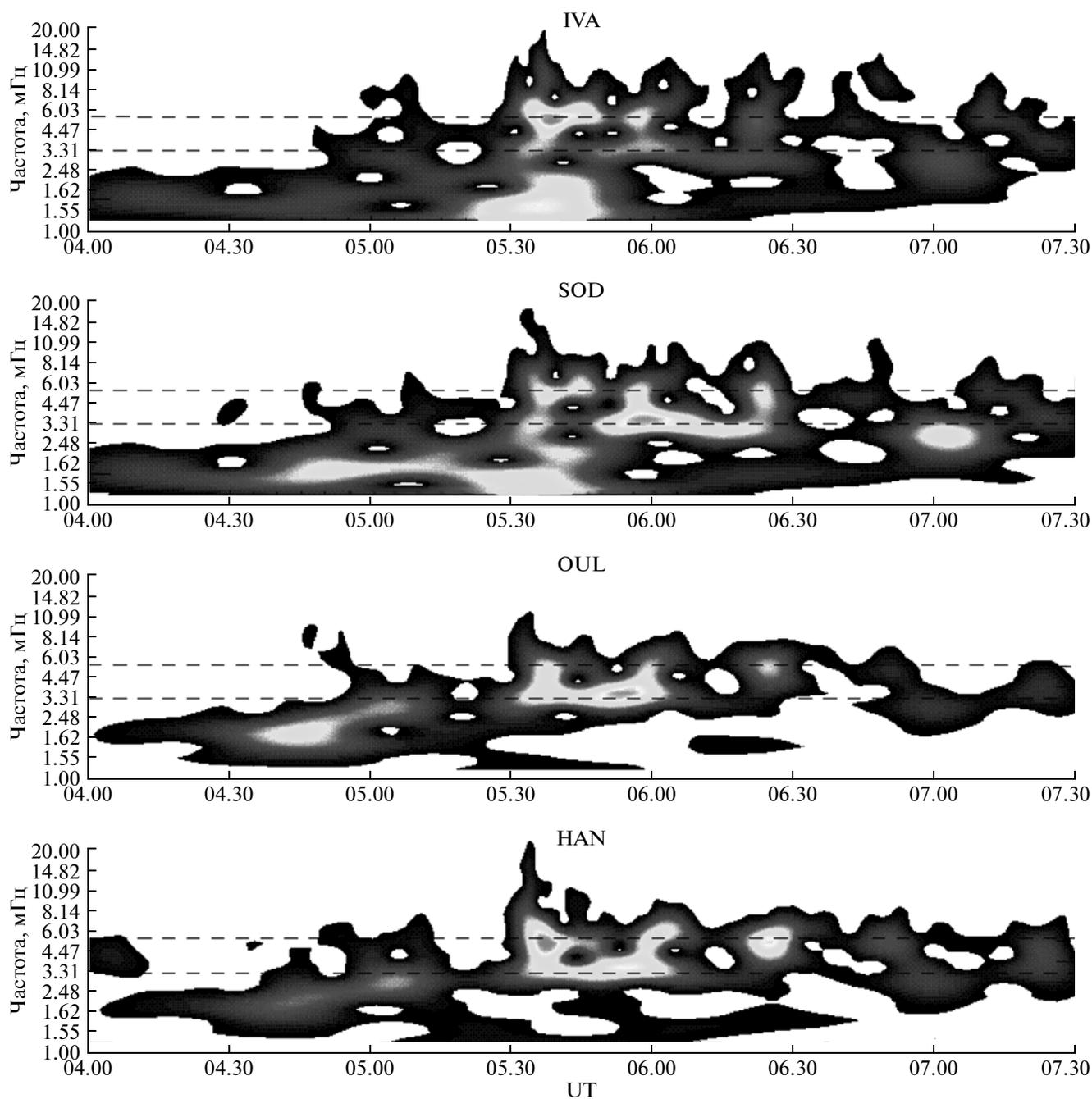


Рис. 6. Динамические вейвлет-спектры (вейвлет morlet 6 порядка) магнитных пульсаций (H -компонента) на меридиональном профиле IVA-SOD-OUL-HAN для интервала B (04.00–07.30 UT). Предварительная высокочастотная фильтрация с частотой отсечки 1 мГц.

сравнению с магнитными пульсациями. В среднем, коэффициент кросс-корреляции между вариациями риометрического поглощения на IVA и АВК для всего интервала B достигает максимального значения $R = 0.33$ при $\Delta t = 20$ с. Такой же временной сдвиг, но при значениях $R = 0.43$, проявляется и при корреляционном анализе магнитных вариаций на этих

станциях. Таким образом, можно считать, что в среднем вариации, как магнитного поля, так и риометрического поглощения, распространяются в сторону хвоста магнитосферы.

Мы попытались сравнить картину распространения одновременных $Pc5$ пульсаций на утренней стороне ($IMAGE$) и в послеполуночном секторе (про-

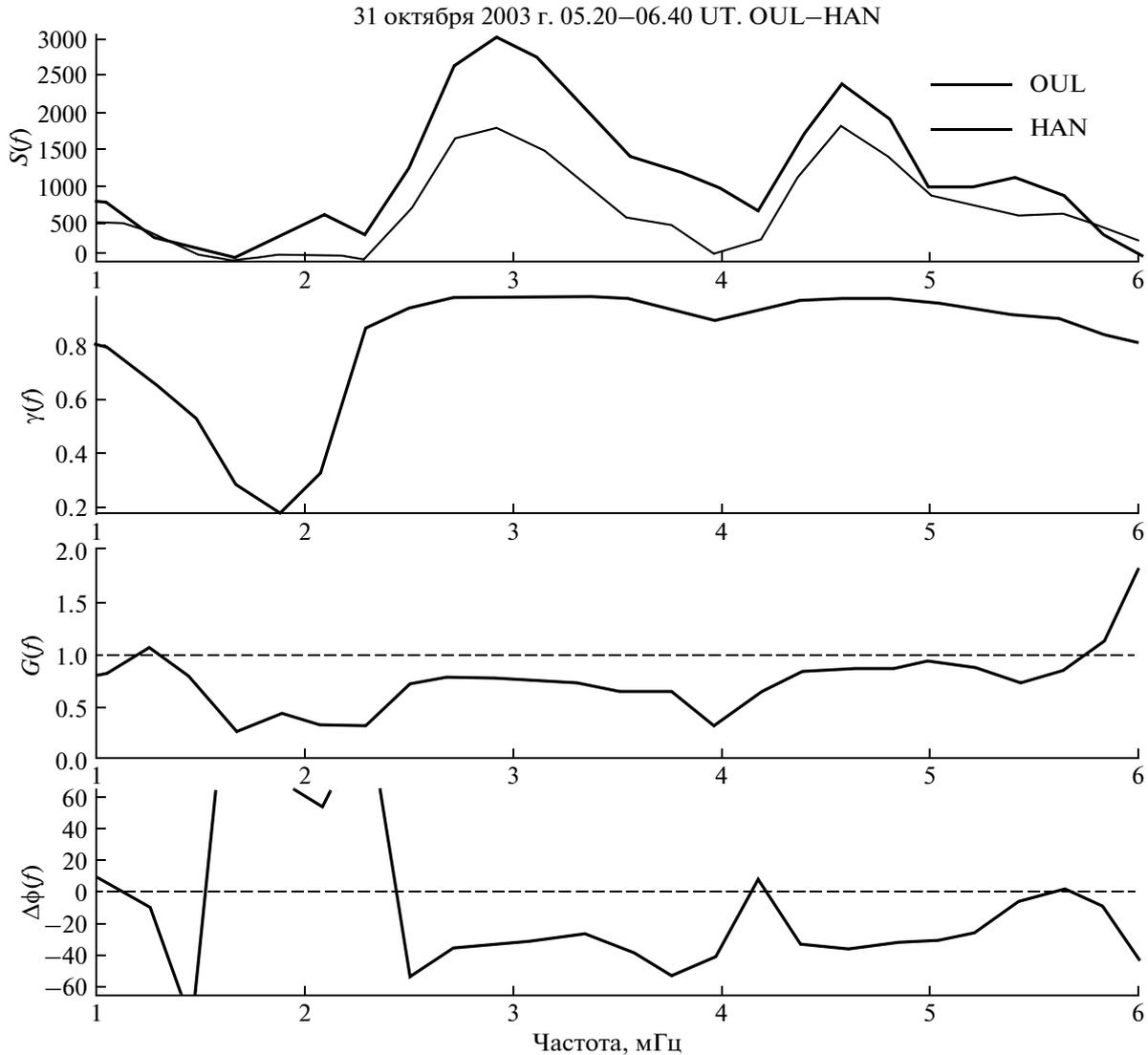


Рис. 7. Градиентный анализ структуры $Pc5$ пульсаций, зарегистрированных 05.20–06.40 UT на станциях OUL–HAN: авто-спектры H -компоненты ($nT^2/Гц$), когерентность $\gamma(f)$, отношение амплитуд $G(f)$, разность фаз $\Delta\phi(f)$ (град).

филь CHD-TIX) примерно на одной геомагнитной широте 65° . Однако синхронность колебаний на утренней и вечерней сторонах оказалась невысокой: во всех случаях, когда на одном из флангов возникали регулярные $Pc5$ пульсации, а на другом либо была суббурия, либо наблюдались широкополосные пульсации малой амплитуды. Наилучшим оказался интервал 05.30–07.00 UT, когда на утреннем фланге наблюдались регулярные $Pc5$, на вечернем – иррегулярные пульсации диапазона $Pc5$. Спектральные пики на разных флангах магнитосферы оказываются различными: на CHD-TIX ~ 3.4 мГц, на IMAGE видны спектральные пики на ~ 2.7 мГц и ~ 4.6 мГц. Направление распространения колебаний было различным: на MAGDAS волны бегут на восток, на IMAGE – в противоположную сторону. Таким образом, как на утреннем, так и на вечернем флангах

магнитосферы, колебания распространяются в антисолнечном направлении, скорости этого распространения оказались различными. Сопоставление азимутальных волновых чисел и фазовых скоростей для $Pc5$ пульсаций на разных флангах показывает, что в среднем на вечернем фланге m меньше, чем на утреннем, а V_{ph} соответственно выше. При этом значения m и V_{ph} варьировались от пакета к пакету в широких пределах, хотя скорость солнечного ветра в этот период оставалась примерно постоянной.

3.4. Колебания в районе геостационарной орбиты. О свойствах $Pc5$ пульсаций в районе геостационарной орбиты можно судить по данным наблюдений на спутниках GOES-10, GOES-12. Во время интервала C оба спутника оказываются в утреннем секторе: GOES-10 ~ 03.00 MLT (рис. 10а), GOES-12 \sim

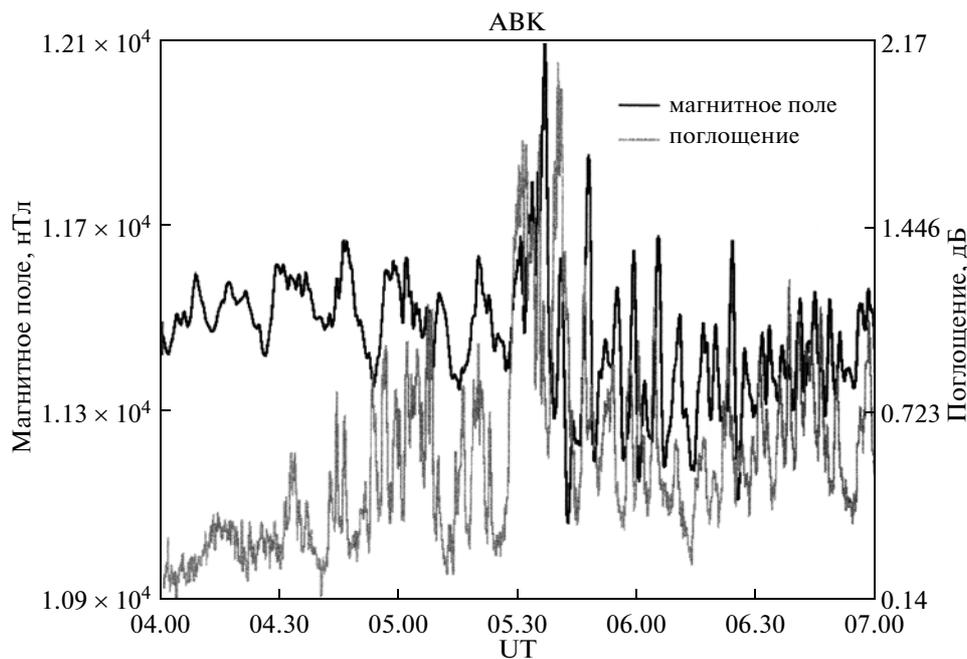


Рис. 8. Наложение $Pc5$ пульсации в H -компоненте магнитного поля и в риометрическом поглощении по данным станции АВК для интервала B (04.00–07.00 UT).

~ 07.00 MLT (рис. 10б). Интенсивные колебания $Pc5$ диапазона наиболее отчетливо были выражены в Hn -компоненте. Вблизи экваториальной плоскости компонента Hr примерно соответствует направлению вдоль силовых линий, He -радиальному, и Hn - азимутальному. Сопоставление с сопряженными станциями MEA и RBQ показывает общую динамику развития колебаний на утреннем фланге магнитосферы как на Земле, так и в магнитосфере, хотя детального совпадения колебаний нет (рис. 10). Такая поляризация в плоскости ортогональной B , когда радиальная компонента много меньше азимутальной ($He \ll Hn$), соответствует крупномасштабным колебаниям с малыми m [Klimushkin et al., 2004]. Компонента сжатия магнитного поля (*compressional*), которая проявляется в вариациях модуля B , также испытывает значительные колебания ($\delta B/B \sim 0.4$). По-видимому, в структуру колебаний значительный вклад вносит магнитозвуковая мода.

Несмотря на общую активизацию волновой активности в одном диапазоне на обоих спутниках, детальное сопоставление одноименных компонент показывает крайне низкую когерентность между ними. Таким образом, эффективный масштаб колебаний оказывается много меньшим расстояния между спутниками. При разнице в азимутальном положении GOES-10 и GOES-12 на $\Delta\lambda \sim 04$ LT, это накладывает ограничение на кажущуюся азимутальную длину волны в районе геостационарной орбиты $m = 24/\Delta\lambda[h] \geq 6$. Разумеется, представление об азимутальной структуре колебаний в

сильно возмущенной магнитосфере в виде плоской однородной волны довольно условно.

3.5. Сопоставление с динамикой энергичных частиц в магнитосфере. Спутники LANL позволяют проследить взаимосвязь вариаций потоков частиц в районе геостационарной орбиты с волновыми геомагнитными возмущениями. Расположение этих спутников для момента времени 05.00 UT показано на рис. 1. Сопоставление вариаций волновой активности и риометрического поглощения с динамикой энергичных частиц в районе геостационарной орбиты для интервалов B – C дано на рис. 9–10.

Усиление суббуревой активности в ~04.00 UT, ~05.30 UT, ~06.30 UT сопровождалось инъекцией энергичных протонов и электронов в магнитосферу. Инъекция энергичных протонов ($E = 50$ – 75 кэВ) в районе геостационарной орбиты на вечерней стороне (рис. 11), как видно по данным LANL-91, LANL-94, слабая (данные с LANL-90 отсутствуют). При этом потоки протонов испытывают осцилляции в $Pc5$ диапазоне (с интенсивностью до $\delta J/J \sim 0.5$) во время всех всплесков волновой активности.

Последовательный дрейф облака энергичных электронов ($E = 50$ – 75 кэВ) через утреннюю сторону, инжектированных в ~04.00 UT, можно проследить по данным LANL-90, LANL-01, LANL-02, и далее LANL-97 (рис. 12). Передний фронт постепенно расплывается, и к послеполуденному сектору облако полностью расплывается (LANL-94, LANL-91).

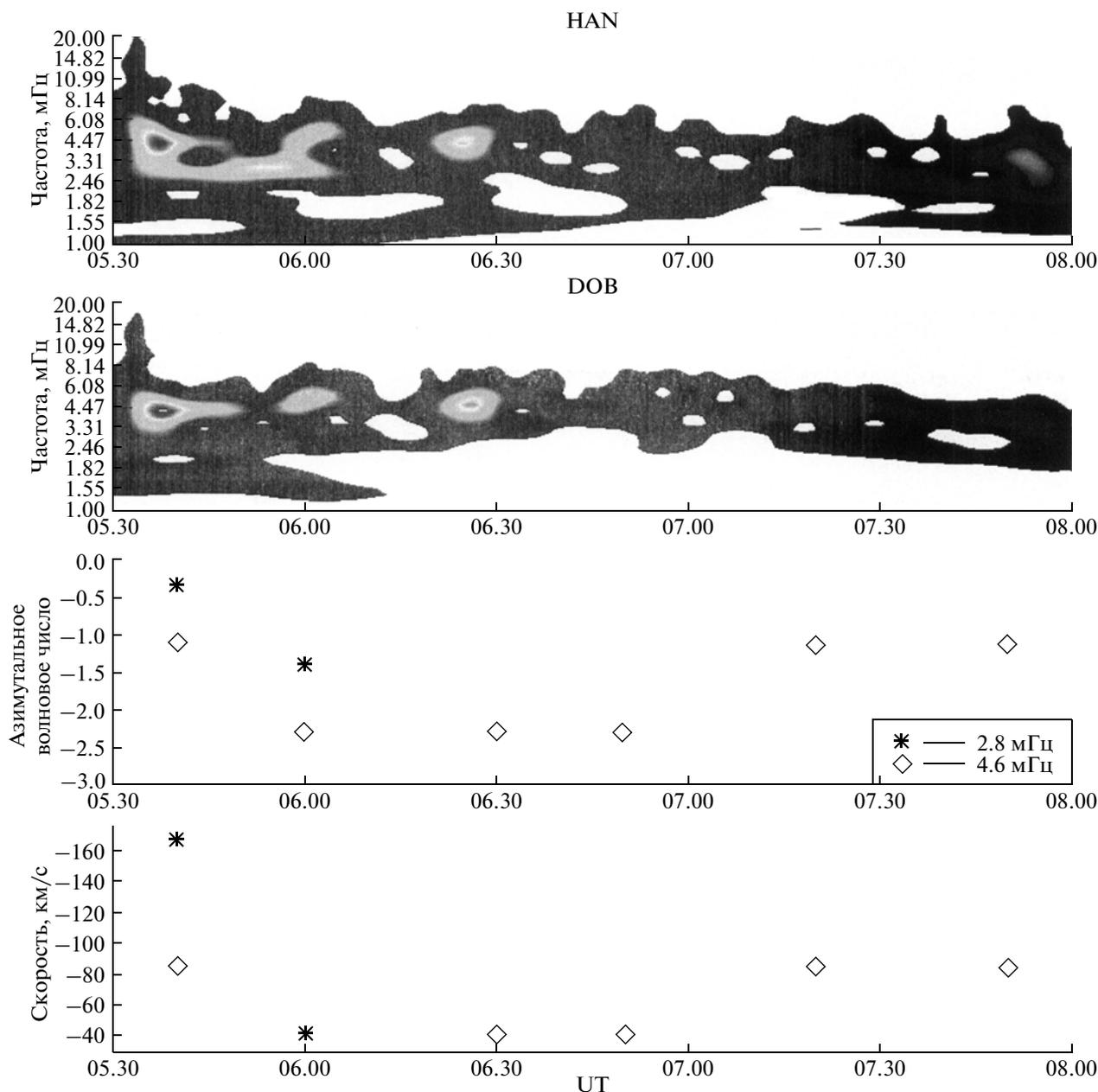


Рис. 9. Вейвлет-спектры $Pc5$ пульсаций на разнесенных по долготе станциях HAN-DOB в интервале 05.30–08.00 UT, азимутальные волновые числа m и фазовые скорости V_{ph} на утреннем (HAN-DOB) фланге на частотах 2.8 мГц и 4.6 мГц.

Резкое поджатие магнитосферы в ~ 05.30 UT вызывает резкое падение интенсивности электронных потоков в точке наблюдения в дневные часы (LANL-02, LANL-97, LANL-94) из-за выхода спутников за магнитопаузу. Интенсивность электронных потоков остается низкой и во время интервала C.

Электронные потоки в утреннем секторе (LANL-90, LANL-01) испытывают интенсивные флуктуации в $Pc5$ диапазоне. В дневные и утренние часы ~ 04.30 UT (LANL-97, LANL-94, LANL-02), еще до подхода скачка плотности солнечного ветра к

магнитосфере, начинаются интенсивные УНЧ вариации потоков электронов. Эти колебания срываются во время выхода спутников из магнитосферы, и затем возобновляются после 07.00 UT. Начало этих колебаний приурочено к моменту инжекции частиц в магнитосферу, и их механизм, по-видимому, отличен от $Pc5$ пульсаций потоков частиц в ранние утренние часы (LANL-01, LANL-90).

3.6. Квазипериодические вариации солнечного ветра и наземный магнитный отклик. Скачки плотности солнечного ветра во время всех трех интервалов со-

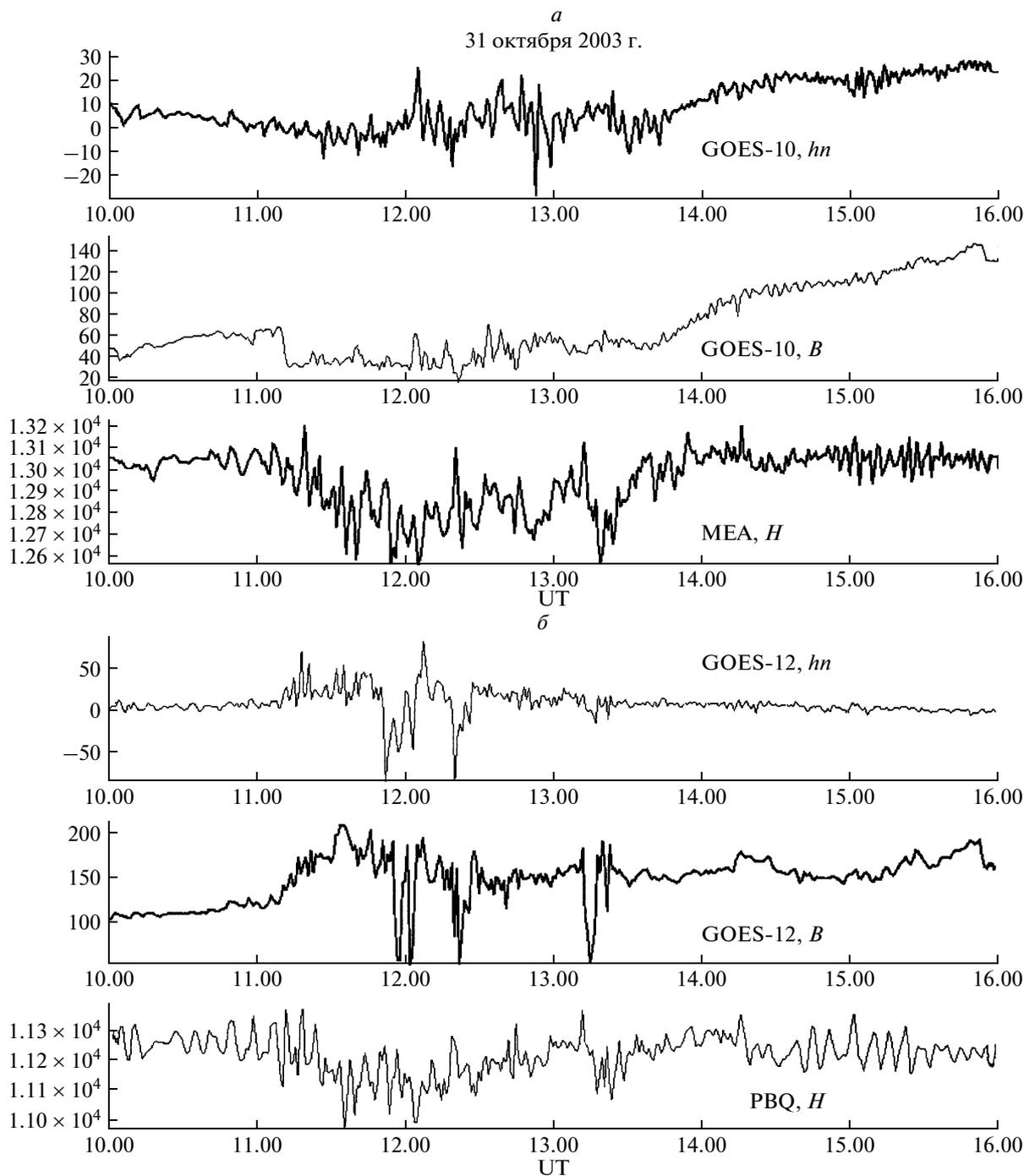


Рис. 10. Вариации магнитного поля в магнитосфере во время интервала *C* (10–16 UT) по данным: (*a*) – спутника GOES-10 (*Hn*-, *B*-компоненты) в нТл, и *H*-компоненты магнитного поля в нТл на сопряженной станции MEA; (*б*) – спутника GOES-12 (*Hn*-, *B*-компоненты) в нТл, и *H*-компоненты магнитного поля в нТл на сопряженной станции PBQ.

держат значительную квазипериодическую составляющую в диапазоне периодов от первых минут до 10 мин. Вариации N практически в значительной мере определяют и вариации динамического давления $P = NV^2$, т.к. скорость солнечного ветра постепенно спадала без резких скачков от ~ 1200 км/с до ~ 1000 км/с.

Орбита GEOTAIL проходила из ночной магнитосферы через утренний фланг. В ~ 05.00 UT плазменная ловушка спутника зарегистрировала внезапное увеличение скорости плазмы до $\sim 10^3$ км/с, что свидетельствует о выходе спутника за границы магнитосферы. В ~ 05.30 UT зарегистрирован резкий скачок N до ~ 60 см $^{-3}$ (рис. 13а). Несмотря на многочислен-

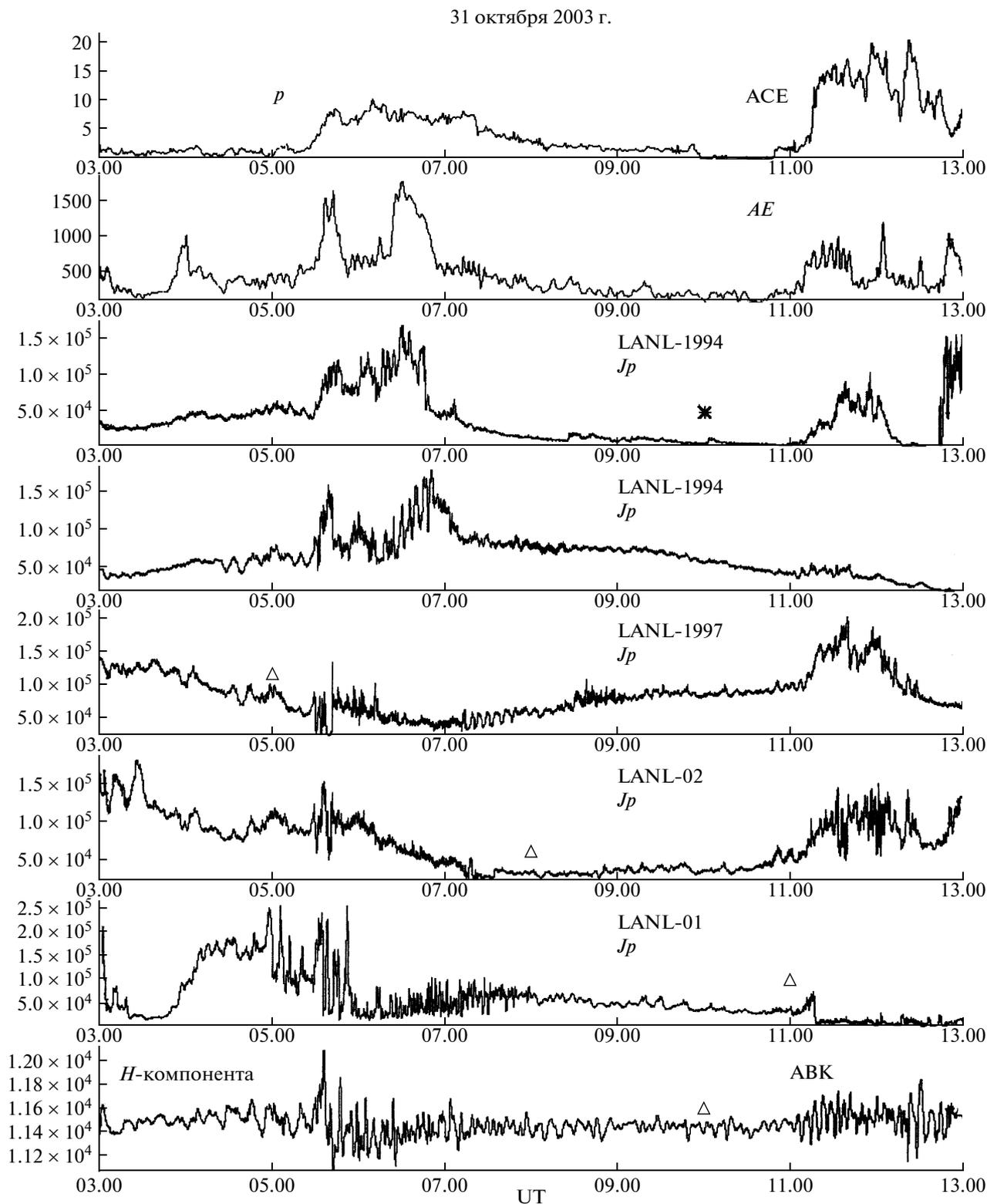


Рис. 11. Динамическое давление P (нПа) по данным спутника ACE, AE -индекс (нТл), потоки протонов J_p пр/(кэВ см² стер с) с $E = 50-75$ кэВ на спутниках LANL-91, LANL-94, LANL-97, LANL-02, LANL-01 (по ходу дрейфа протонов), магнитное поле (нТл) на станции АВК для интервалов времени В-С (03.30–13.00 UT) 31.10.2003 г. Треугольниками обозначен местный геомагнитный полдень, звездочкой обозначена местная геомагнитная полночь.

31 октября 2003 г.

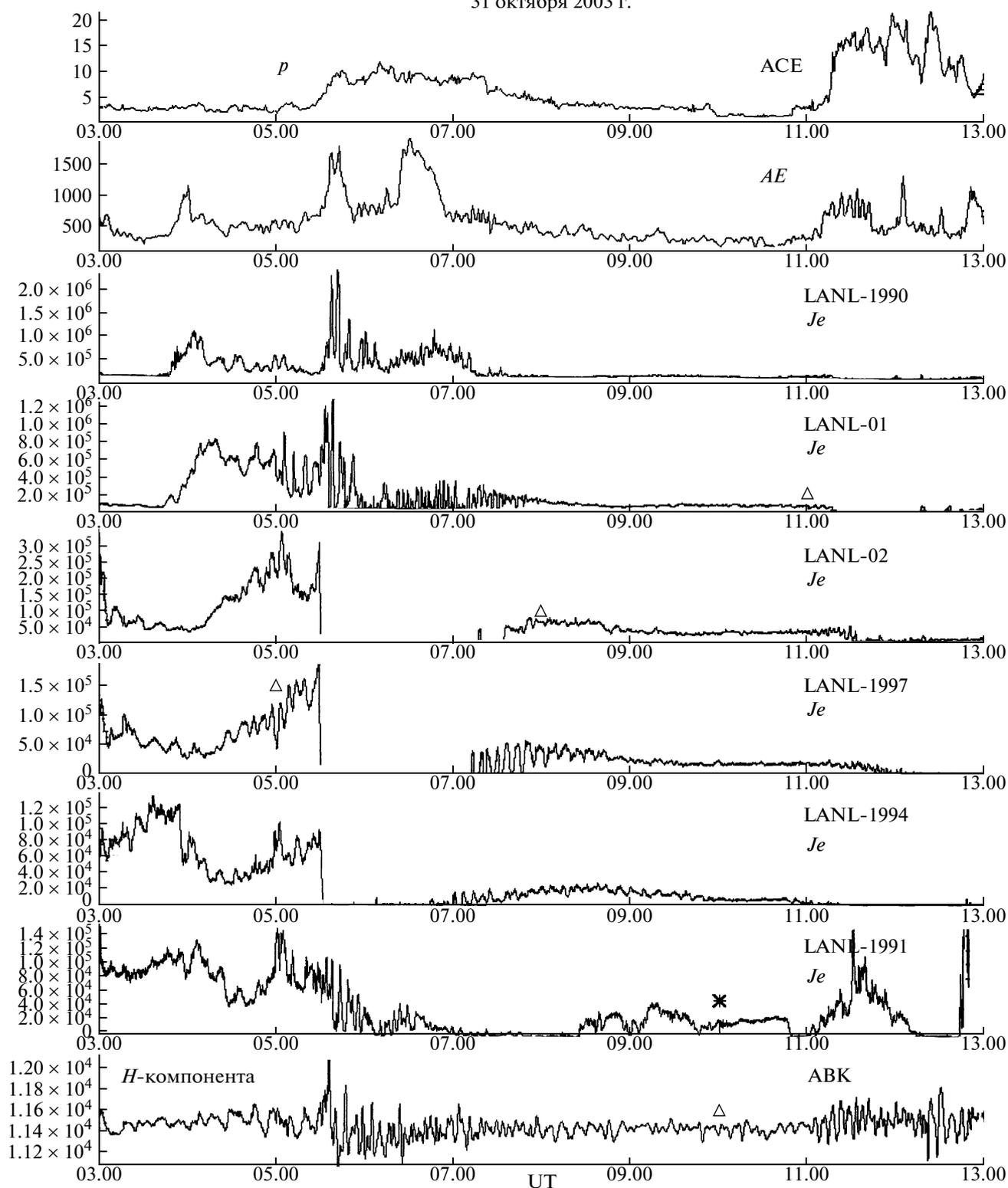


Рис. 12. Динамическое давление P (нПа) по данным спутника ACE, AE -индекс (нТл), потоки электронов J_e (эл/(кэВ см² стер с)) с $E = 50\text{--}75$ кэВ на спутниках LANL-90, LANL-01, LANL-02, LANL-97, LANL-94, LANL-91 (по ходу дрейфа электронов), магнитное поле в нТл на станции АВК для интервалов времени В–С (03.30–13.00 UT) 31.10.2003 г.

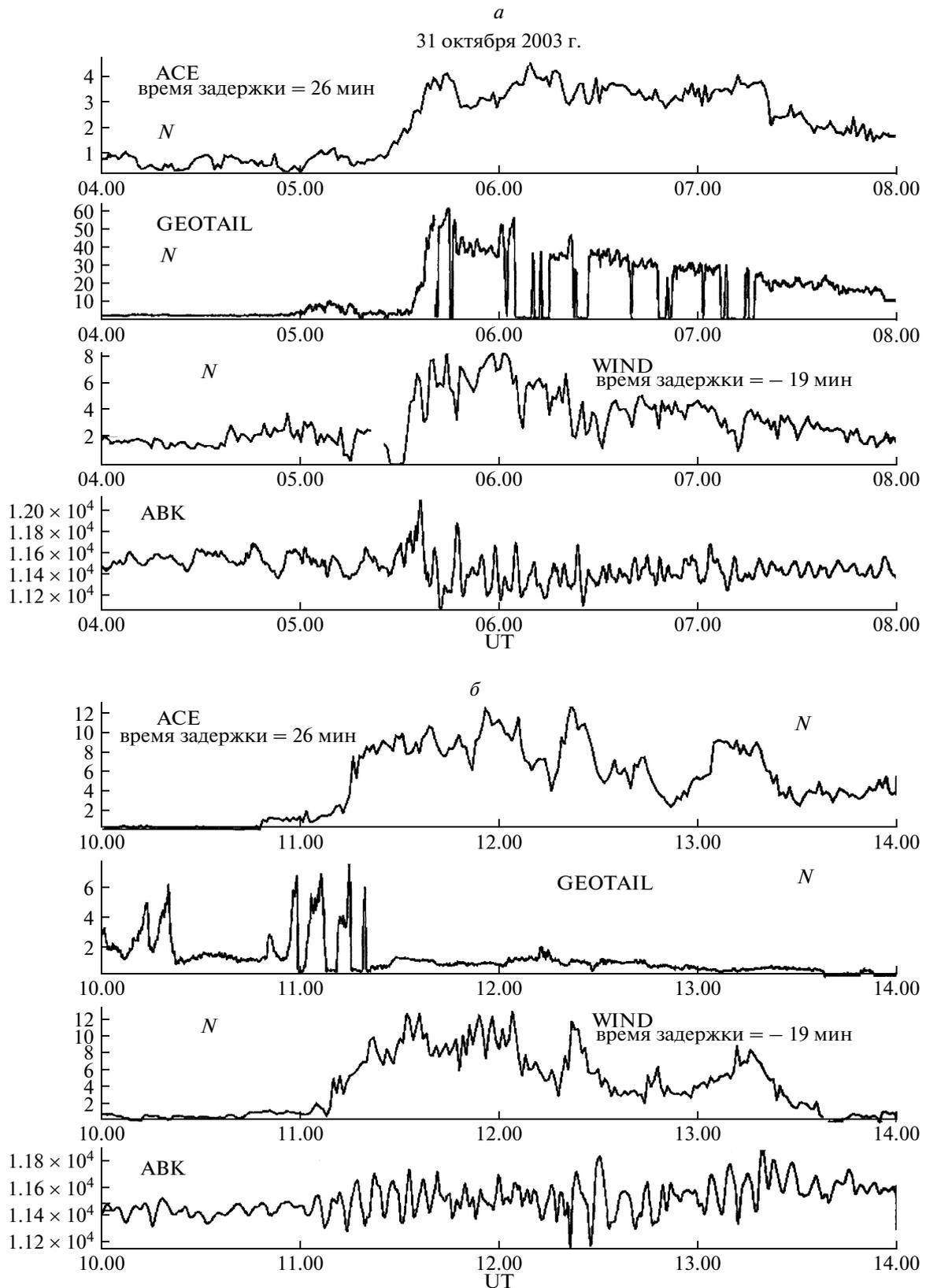


Рис. 13. Сопоставление вариаций концентрации протонов $N(t)$ (см^{-3}) по данным спутников ACE (сдвиг по времени на 26 мин), GEOTAIL (без сдвига), WIND (сдвиг по времени на -19 мин) с вариациями H -компоненты магнитного поля (нТл) на АВК во время интервалов B (04.00–08.00 UT по времени на наземной станции) и C (10.00–14.00 UT).

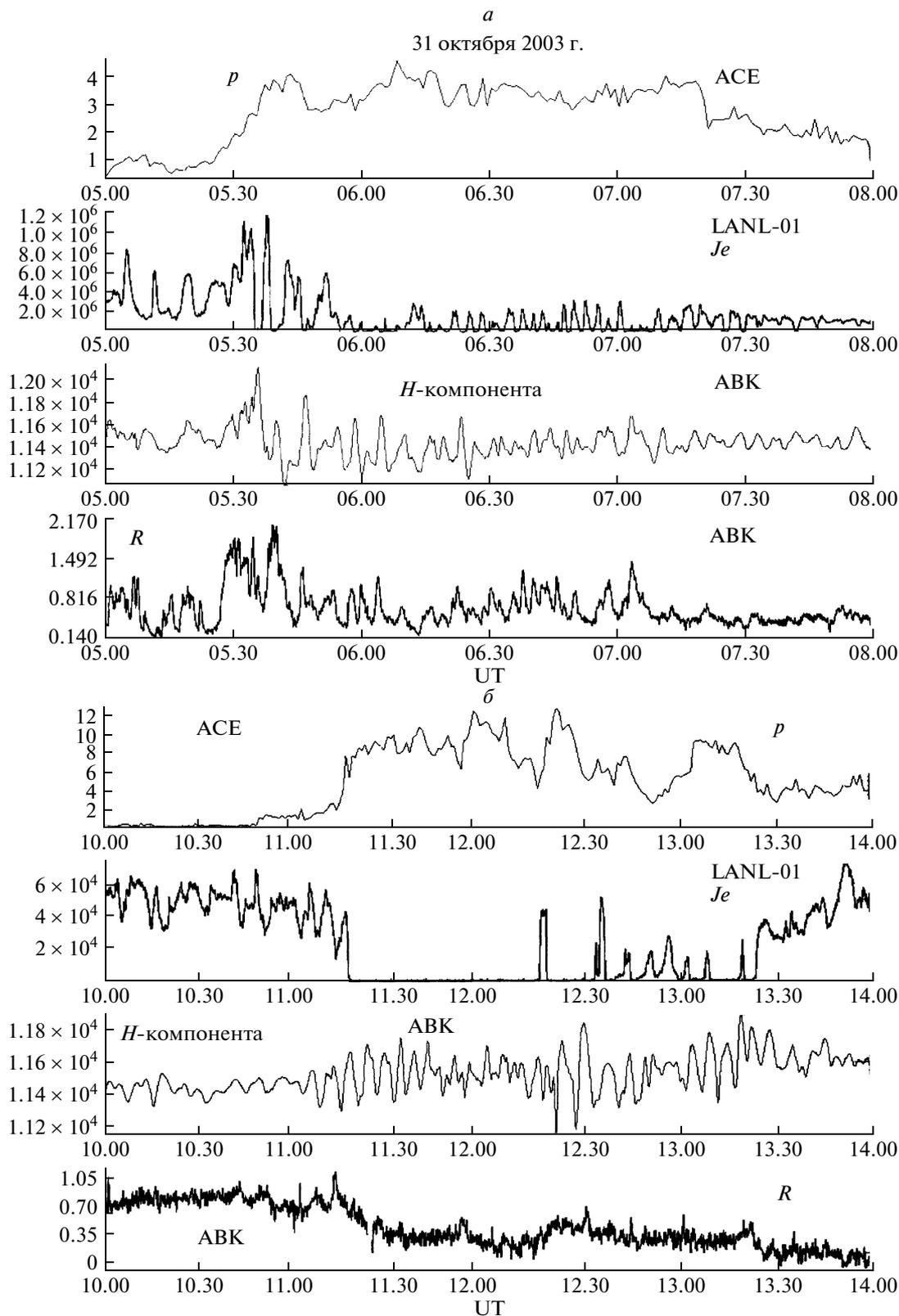


Рис. 14. Сопоставление вариаций концентрации протонов $N(t)$ (см^{-3}) по данным спутника ACE (сдвиг по времени на 26 мин), потоков электронов J_e (эл/(кэВ см^2 стер с)) с $E = 50\text{--}75$ кэВ на геостационарном спутнике LANL-01, риометрического поглощения (дБ) и H -компоненты магнитного поля (нТл) на АВК во время интервалов: (а) – В (05–08 UT), (б) – С (10–14 UT).

ные пробелы в данных, видна иррегулярная структура подошедшего к магнитопаузе потока плазмы. Далее, в ~ 11.00 UT GEOTAIL зарегистрировал резкие квазипериодические ($T \sim 6$ мин) скачки магнитного поля и плазмы (рис. 13б), которые, по-видимому, были вызваны тем, что спутник оказался в поле поверхностной волны на границе магнитосферы.

Сопоставление вариаций динамического давления солнечного ветра $P(t)$ на ACE во время интервала В (04.00–08.00 UT) с вариациями H -компоненты магнитного поля на АВК показывает их близкую временную динамику (рис. 14а). Здесь же приведены и вариации электронных потоков на LANL-01 и риометрического поглощения на АВК. На соответствующих вейвлет-спектрах (не показаны) характерным пикам флуктуаций N на ACE (2.2, 3.3, 4.1 мГц) соответствуют сдвинутые по частоте пики магнитных флуктуаций на Земле (2.5, 3.9, 4.7 мГц). В принципе, не следует ожидать точного совпадения этих частот, даже при наличии физической связи между флуктуациями P и наземным откликом, из-за сложного спектрального состава, нестационарности временных рядов, неизвестной переходной функции между вариациями в солнечном ветре и магнитосфере, и т.п.

Еще более тесное соответствие между временной динамикой вариаций $P(t)$ и наземными флуктуациями магнитного поля на АВК проявляется для интервала С (10.00–14.00 UT) (рис. 14б). Каждый из волновых пакетов, зарегистрированный на АВК, имеет соответствие в вариациях $P(t)$. Аналогично интервалу В, спектральные пики на АВК (3.0, 3.6 мГц) смещены к более высоким частотам по сравнению со спектральными пиками флуктуации N (2.7, 3.3 мГц). Вариации электронных потоков на LANL-01 и риометрического поглощения на АВК имеют близкую временную динамику и частотный состав, хотя детального соответствия между ними нет.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Длиннопериодные осцилляции геомагнитных силовых линий могут возбуждаться как крупномасштабными источниками (неустойчивость пограничных слоев магнитосферы при высоких скоростях обтекания солнечным ветром, скачки динамического давления), так и мелкомасштабными (неравновесные потоки магнитосферных частиц). Различие в механизмах возбуждения должно проявляться в различии между поперечными структурами, поляризации и скорости распространения колебаний. Крупномасштабные источники будут преимущественно возбуждать колебания с большим азимутальным масштабом (тороидальные), т.е. малыми m , которые эффективно проникают во внутреннюю магнитосферу и возбуждают резонансные колебания силовых линий. Азимутальная скорость этих возмущений

определяется солнечным ветром, т.е. направлена в антисолнечном направлении. Возбуждение локализованных колебаний, т.е. колебаний с $m \gg 1$ (полоидальные), происходит потоками энергичных частиц с неравновесным распределением по скоростям или пространству. Такие колебания в значительной степени экранируются ионосферой от наземных магнитометров. Колебания, возбуждаемые инжектированными в магнитосферу частицами, будут распространяться в азимутальном направлении в сторону магнитного дрейфа частиц, т.е. в солнечном направлении.

Изучение локальной пространственной структуры глобальных $Pc5$ пульсаций на наземных станциях в утреннем и вечернем секторах показало, что колебания распространяются в азимутальном направлении в антисолнечном направлении. Наличие эффектов распространения позволяет исключить возможность интерпретации глобальных $Pc5$ колебаний как собственных колебаний магнитосферной полости (*cavity oscillations*). Большие масштабы и азимутальное распространение в сторону потока солнечного ветра наблюдаемых $Pc5$ волн позволяют также исключить возможность их генерации потоками частиц. Помимо этого, наблюдения на LANL показывают отсутствие значительной инжекции протонов во время этих событий. Все теоретические модели генерации колебаний частицами (например, [Похотелов и др., 1986]) указывают на преимущественное возбуждение мелкомасштабных колебаний с $m \gg 1$, которые должны доходить до земной поверхности сильно ослабленными. Эти соображения подтверждаются и наблюдениями т.н. storm-time $Pc5$ [Barfield and McPherron, 1972; Walker et al., 1982], которые имеют очень большую амплитуду в районе геостационарной орбиты, но практически не видны на земной поверхности. В данном событии $Pc5$ пульсации прекрасно видны на Земле, что косвенно указывает на малые m . Прямые измерения на азимутальном профиле IMAGE подтверждают большой азимутальный масштаб возбуждаемых колебаний, $m \sim 2$.

Рассмотрение этого события ставит несколько важных вопросов о природе и механизмах возбуждения глобальных $Pc5$ пульсаций и их воздействия на потоки частиц. Традиционно считается, что генератором крупномасштабных $Pc5$ пульсаций является солнечный ветер, а именно неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (К-Г) тангенциального разрыва между потоком солнечной плазмы и магнитосферой. В данном событии мы видим, что это условие хотя и необходимо, но недостаточное – возбуждение колебаний явно стимулируется скачками N . Действительно, V примерно постоянна и весьма велика (>1000 км/с), а колебания появляются только в определенные интервалы, совпадающие со скачками плотности солнечного ветра. В

то же время, наблюдаемые волны нельзя отнести к P_{SC5} пульсациям — затухающему цугу колебаний, возбуждаемому при импульсном воздействии на магнитосферу. Как показывает сопоставление динамических спектров возмущений, наблюдаемые колебания не являются лишь вынужденными откликом магнитосферы на квазипериодические вариации давления солнечного ветра, как полагают Kerko et al. [2002], а их эволюция определяется внутримангнитосферными параметрами.

По нашему мнению, своеобразие природы и механизма возбуждения глобальных $Pc5$ пульсаций связано с качественным отличием в режимах обтекания магнитосферы при умеренных и больших скоростях солнечного ветра. При умеренных V неустойчивые колебания локализованы на границе раздела магнитосфера-магнитослой, и экспоненциально спадают вглубь магнитосферы. При этом на определенной внутренней оболочке может происходить локальное резонансное увеличение амплитуды колебаний. При больших V граница раздела становится сверхотражающей, т.е. внутримангнитосферные МГД моды усиливаются при взаимодействии с движущейся границей [Mann et al., 1999]. В этом случае, неустойчивыми могут оказаться не локализованные на границе колебания, а осцилляции всего магнитосферного волновода, образуемого магнитопаузой и точкой отражения внутри магнитосферы [Wright, 1994]. Возбуждаемая волноводная МГД мода будет зацеплена с альвеновскими колебаниями силовых линий. В реальной магнитосфере, по-видимому, реализуется жесткий режим возбуждения волновода, для которого нужно начальное возмущение конечной амплитуды. Скачки давления солнечного ветра и создают такое возмущение.

Другая возможность стимуляции магнитосферных колебаний нестационарным потоком солнечного ветра связана с тем, что скачки давления (с амплитудой ΔP и толщиной фронта δ) вызывают смещение магнитопаузы к новому положению, во время которого граница движется с ускорением g . Добавление силы инерции $F = \rho g \sim \Delta P / \delta$ к балансу сил на границе приводит к тому, инкремент неустойчивости К-Г увеличивается [Потапов и Клайн, 1973; Mishin, 1993]. Это увеличение можно трактовать как “подключение” неустойчивости Релей-Тейлора (Р-Т) к неустойчивости К-Г. Согласно этому механизму, если за время ускоренного движения границы возмущения успевают нарасти до конечной величины, то динамика магнитосферных пульсаций должна лучше соответствовать вариациям производной давления $\delta P(t) / \delta t$, чем самого давления $P(t)$. Таким образом, спектры магнитосферного отклика должны быть сдвинуты в более высокочастотную область по сравнению со спектрами вариаций давления, т.к. $H(f) \sim fP(f)$. Такое смещение было

отмечено при сопоставлении спектров флуктуации $P(f)$ и наземного магнитного поля $H(f)$.

Характерные дисперсионные особенности МГД моды, захваченной в волновод между магнитопаузой и точкой отражения внутри магнитосферы, могут быть качественно проиллюстрированы на модели прямоугольного однородного волновода [Wright, 1994]. Групповая скорость захваченной в волновод БМЗ моды в азимутальном

направлении (ось Y) равна $V_g = \frac{\partial \omega(k)}{\partial k_y} = \frac{k_y}{\omega(k)} V_A^2$.

Мелкомасштабные возмущения с $m = k_y L R_E \gg 1$ быстро выносятся со скоростью $V_g \approx V_A$ в хвост магнитосферы и не нарастают до больших амплитуд, в то время как крупномасштабные моды с $m \sim 1$ могут накапливаться внутри волновода, т.к. их $V_g \ll V_A$. Таким образом, дисперсия волновода приводит к избирательной селекции мод с малыми m . Частоты таких мод определяются условием квантования $k_x L_X \sim \pi n$ в волноводе с радиальным размером L_X . Вытекающая из него оценка периода основной (четверть-волновой) моды $T \sim 4L_X / V_A$ совпадает с периодом глобальных $Pc5$ пульсаций ~ 6 мин при $L_X \sim 5R_E$ и $V_A \sim 400$ км/с. Обращение поляризации в области локального минимума амплитуды глобальных $Pc5$ пульсаций, обнаруженное Клейменовой и Козыревой [2005б], может быть связано с образованием узла радиальной структуры волноводной моды. Столь низкое значение характерной альвеновской скорости в магнитосфере может быть обусловлено преобладанием тяжелых ионов O^+ на восстановительной фазе магнитной бури. Хотя это предположение и согласуется с типичной картиной динамики ионов во время магнитных бурь, но требует специальной проверки.

Определение характеристик распространения колебаний в азимутальном направлении могут дать важную информацию о природе источника колебаний [Wright and Rickard, 1995]. В частности, если колебания являются вынужденным откликом на распространяющееся вдоль магнитопаузы возмущение, то, несмотря на возможный разброс частот от пакета к пакету, кажущиеся фазовые скорости должны оказаться одинаковыми и равняться скорости обтекания солнечным ветром магнитосферы. Если же только начальное возмущение создается скачком давления солнечного ветра, а в дальнейшем возмущение распространяется внутри магнитосферного волновода, “забывая” про начальный триггер, то кажущиеся фазовые скорости определяются структурой волновода и параметрами возмущения, и вообще говоря, будут различными для разных волновых пакетов. Анализ характеристик распространения $Pc5$ колебаний показывает, что возбуждение МГД волновода на утреннем и вечернем флангах про-

исходит независимо. Сильный разброс значений m и V_{ph} от одного волнового пакета к другому свидетельствует о том, что непосредственным источником колебаний являются не возмущения переносимые солнечным ветром, а возмущения внутри МГД волновода. Резкие иррегулярные скачки P являются триггером колебаний МГД волновода, которые затем “забывают” про него, и их дальнейшее распространение определяется структурой волновода и параметрами начального импульса.

Зарегистрированные в районе геостационарной орбиты колебания, как на вечерней, так и на утренней стороне, сопровождаются сильным сжатием магнитного поля ($\delta B/B \sim 0.4$). Поэтому глобальные $Pc5$ пульсации нельзя интерпретировать как обычные альвеновские колебания. В принципе, колебания альвеновского типа с сильным сжатием поля регистрируются в магнитосфере (т.н. storm-time $Pc5$), но появление компоненты сжатия в них вызывается наличием горячей плазмы конечного давления ($\beta \sim 1$). В данном случае это маловероятно, т.к. анализ данных LANL показал наличие лишь очень слабой инжекции частиц. По-видимому, зарегистрированные колебания представляют собой магнитозвуковую моду, захваченную в магнитосферный волновод. Интенсивные магнитозвуковые колебания должны эффективно модулировать потоки частиц, что следует из оценки гидродинамической части возмущения $\delta F/F \sim \delta B/B$. Наличие резонансных эффектов в локальной меридиональной структуре поля, выделенных с помощью фазового градиентного анализа, говорит о том, что волноводная магнитозвуковая мода зацеплена с альвеновскими колебаниями.

Малая когерентность пульсаций потоков частиц и магнитного поля может быть связана с тем, что отклик частиц, особенно резонансных, на вариации поля зависит от энергии и питч-угла, и при широком энергетическом диапазоне датчиков вариации потоков с разными амплитудно-фазовыми характеристиками оказываются перемешанными. Тем не менее, мы полагаем, что представления о том, что пульсации потоков частиц и риометрического поглощения вызваны лишь пассивной модуляцией потоков интенсивными колебаниями, явно оказываются недостаточными. Как оказалось, пространственно-временная структура пульсаций риометрического поглощения не повторяет структуру геомагнитных $Pc5$ пульсаций. Только на сравнительно короткое время и в определенном месте вариации риометрического поглощения отчетливо синхронизируются с геомагнитными вариациями, подобно синхронизации двух слабо связанных осцилляторов систем.

В нашем случае такими системами могут быть магнитосферный МГД волновод и система турбулентность — электроны. Последняя система описы-

вается уравнениями квазилинейной теории, имеющими вид балансных уравнений между числом резонансных частиц в силовой трубке и мощностью электронно-циклотронных шумов. Балансные уравнения обладают собственными квазипериодическими решениями с частотой Ω , которая при характерных характеристиках потоков электронов попадает в диапазон $Pc5$ [Беспалов, 1981]. Наличие собственной частоты делает электронные потоки чувствительными к внешним периодическим возмущениям с близкими к Ω частотами. Таким образом образуются два связанных резонансных контура: магнитосферный МГД волновод/резонатор и система частицы + циклотронные шумы. В моменты совпадения частот этих резонансных систем может происходить синхронизация колебаний. По-видимому, именно такая ситуация реализуется в рассмотренном событии. Относительная кратковременность синхронизации связана с расстройкой по частотам из-за нестабильности Ω во времени. По-видимому, аналогичный процесс взаимодействия МГД волноводной моды с ионно-циклотронной турбулентностью происходил на вечернем фланге магнитосферы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возбуждаемые глобальные $Pc5$ колебания на фазе восстановления магнитной бури являются результатом возбуждения МГД волновода на флангах магнитосферы. Магнитосферный волновод оказывается в метастабильном состоянии при высоких скоростях обтекания магнитосферы солнечным ветром, и квазипериодические флуктуации его плотности стимулируют возбуждение волновода. Возбуждаемые волноводные моды сносятся в хвост магнитосферы. В утреннем секторе магнитосферы, в области инжекции электронных потоков, происходит взаимодействие между колебаниями МГД волновода и релаксационными колебаниями электронных потоков. Это взаимодействие проявляется в виде слабо-связанных квазипериодических пульсаций магнитного поля и риометрического поглощения.

Выражаем признательность за предоставленные данные *IMAGE* (A. Viljanen), *CARISMA* (I. Mann), *Greenland Array* (J. Watermann), *MAGDAS* (K. Yumoto), *LANL* (G. Reeves), финской риометрической сети (T. Manninen), *GOES* (H. Singer), риометрической сети *NORSTAR* (E. Donovan). Благодарим за полезные обсуждения О.В. Козыреву, Н.П. Клейменов, А.С. Потапова. Данная работа поддержана грантом РФФИ № 10-05-90716-моб_ст, и Программой Президиума РАН № 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева Л.Т., Распопов О.М., Киселев Б.В., Логинов Г.А. Геомагнитные пульсации типа Pc5 как элемент суббури // Полярные сияния, М.: Наука. № 23. С. 93–104. 1974.
- Беспалов П.А. Волны высыпаний в авроральной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. № 6. С. 1018–1022. 1981.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Раута Х. Pc5 пульсации в геомагнитном поле и риометрическом поглощении в утреннем секторе авроральных широт // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 37. № 5. С. 51–59. 1997.
- 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. Т. 45. № 1. С. 75–83. 2005а.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Интенсивные геомагнитные пульсации Pc5 в восстановительную фазу супербури октября и ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 5. С. 597–612. 2005б.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Проникновение геомагнитных пульсаций Pc5 на необычно низкие широты во время восстановительной фазы суперсильной магнитной бури 31 октября 2003 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. С. 174–178. 2008.
- Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–555. 2004.
- Потапов А.С., Клайн Б.И. Влияние движения магнитополосы на неустойчивость тангенциального разрыва в земной магнитосфере // Исслед. геомагн., аэрономии и физ. Солнца. Т. 27. С. 49–53. 1973.
- Пилипенко В.А. Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле // Современные математические и геологические модели природной среды. М. ИФЗ РАН, С. 187–199. 2002.
- Похотелов О.А., Незлина Ю.М., Пилипенко В.А. Дрейфово-анизотропная неустойчивость кольцевого тока // ДАН СССР. Т. 289. № 2. С. 332–335. 1986.
- Соловьев С.И., Баишев Д.Г., Баркова Е.С., Муллаяров В.А., Самсонов С.Н., Потапов А.С., Ду А. Возбуждение пульсаций Pc5 в периоды магнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. и их связь с амплитудной модуляцией ОНЧ-излучения и риометрического поглощения // Солнечно-земная физика. Вып. 8. С. 169–171. 2005.
- Baransky L.N., Green A.W., Fedorov E.N., Kurneva N.A., Pilipenko V.A., Worthington W. Gradient and polarization methods of ground-based monitoring of magnetospheric plasma // J. Geomag. Geoelectr. V. 47. P. 1293–1309. 1995.
- Barfield J.N., McPherron R.L. Statistical characteristics of storm-associated Pc5 micropulsations observed at synchronous equatorial orbit // J. Geophys. Res. V. 77. P. 4720–4733. 1972.
- Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Resonant acceleration and diffusion of outer zone electrons in an asymmetric geomagnetic field // J. Geophys. Res. V. 108. № 3. SMP 11-1. doi 10.1029/2001JA009202. 2003.
- Engebretson M.J., Glassmeier K.-H., Stellmacher M., Hughes W.J. The dependence of high-latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of high-speed solar wind streams // J. Geophys. Res. V. 103. № 11. P. 26271–26283. 1998.
- Fedorov E., Pilipenko V., Engebretson M.J., Rosenberg T.J. Alfvén wave modulation of the auroral acceleration region // Earth, Planets, and Space. V. 56. № 7. P. 649–661. 2004.
- Keiling A., Wygant J.R., Cattell C., Peria W., Parks G., Temerin M., Mozer F.S., Russell C.T., Kletzing C.A. Correlation of Alfvén wave Poynting flux in the plasma sheet at 4–7 Re with ionospheric electron energy flux // J. Geophys. Res. V. 107. № 7. SMP 24-1. DOI:10.1029/2001JA900140. 2002.
- Kepko L., Spence H.E., Singer H.J. ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations // Geophys. Res. Lett., V. 29. № 8. doi:10.1029/2001GL014405. 2002.
- Kessel R., Mann I.R., Fung S.F., Milling D.K., O’Connell N. Correlation of Pc5 power inside and outside the magnetosphere // Ann. Geophys. V. 22. № 2. P. 629–641. 2004.
- Kivelson M.G., Pu Z.Y. The Kelvin-Helmholtz instability on the magnetopause // Planet. Space Sci. V. 32. № 11. P. 1335–1341. 1984.
- Klimushkin D. Yu., Mager P.N., Glassmeier K.-H. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wave numbers in a finite pressure plasma in the Earth’s magnetosphere // Ann. Geophys. V. 22. P. 267–287. 2004.
- Krishnaswamy S., Rosenberg T.J. Modulated ionospheric absorption unaccompanied by significant geomagnetic pulsations // Mem. Natl. Inst. Polar Res. V. 48. P. 171–182. 1987.
- Mathie R.A., Mann L.R. On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at mid-latitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt // J. Geophys. Res. V. 106. A12. P. 29783–29796. 2001.
- Mann J.R., Wright A.N., Mills K., Nakariakov V.M. Excitation of magnetospheric waveguide modes by magnetosheath flows // J. Geophys. Res. V. 104. P. 333–354. 1999.
- Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability // J. Geophys. Res. V. 98. P. 21365–21371. 1993.
- Nose M., Iyemori T., Sugiura M., Slavin J.A., Hoffman R.A., Winningham J.D., Sato N. Electron precipitation accompanying Pc5 pulsations observed by the DE satellites and at a ground // J. Geophys. Res. V. 103. P. 17587–17604. 1998.
- Olson J.V., Rostoker G. Longitudinal phase variations of Pc4–5 micropulsations // J. Geophys. Res. V. 83. P. 2481–2488. 1978.
- Olson J.V., Rostoker G., Olchowy G. A study of concurrent riometer and magnetometer variations in the Pc4–5 pulsation band // J. Geophys. Res. V. 85. P. 1695–1702. 1980.

- *Paquette J.A., Matthews D.L., Rosenberg T.J., Lanzerotti L.J., Inan U.S.* Source regions of long-period pulsation events in electron precipitation and magnetic fields at South Pole Station // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 3869–3877. 1994.
- *Posch J.L., Engebretson M.J., Weatherwax A.T., Detrick D., Hughes W.J., MacLennan C.G.* Characteristics of broadband ULF magnetic pulsations at conjugate cusp latitude stations // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 311–332. 1999.
- *Potapov A., Guglielmi A., Tsegmed B., Kultima J.* Global *Pc5* event during 29–31 October 2003 magnetic storm // *Adv. Space Res.* V. 38. P. 1582–1586. 2006.
- *Samson J.C., Rostoker G.* Response of dayside *Pc5* pulsations to substorm activity in the nighttime magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 733–752. 1981.
- *Southwood D.J., Kivelson M.G.* Charged particle behavior in low-frequency geomagnetic pulsations. I. Transverse waves // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 5643–5655. 1981.
- *Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A., Wahlund J.-E.* Small scale Alfvénic structure in the aurora // *Space Sci. Reviews.* V. 93. № 3/4. P. 423–533. 2000.
- *Trivedi N.B., Arora B.R., Padilha A.L., Da Costa J.M., Dutra S.L.G., Chamalaun F.H., Rigoti A.* Global *Pc5* geomagnetic pulsations of March 24, 1991, as observed along the American sector // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. P. 1683–1687. 1997.
- *Walker A.D.M., Greenwald R.A., Korth A., Kremser G.* STARE and GEOS-2 observations of a storm time *Pc5* ULF pulsation // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 9135–9146. 1982.
- *Wright A.N.* Dispersion and wave coupling in inhomogeneous MHD waveguides // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 159–167. 1994.
- *Wright A.N., Rickard G.J.* ULF pulsations driven by magnetopause motions: Azimuthal phase characteristics // *J. Geophys. Res.* V. 100. P. 23703–23710. 1995.