

УДК 550.385.37

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc3$ НА ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ В НАЧАЛЬНУЮ ФАЗУ МАГНИТНОЙ БУРИ 5 АПРЕЛЯ 2010 г.

© 2013 г. Н. Г. Клейменова¹, Н. Р. Зелинский², О. В. Козырева¹, Л. М. Мальшева¹,
А. А. Соловьев², Ш. Р. Богоутдинов²

¹Институт физики Земли РАН, г. Москва

²Геофизический Центр РАН, г. Москва

e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 20.11.2012 г.

Впервые выполнен анализ данных 1-секундных наблюдений геомагнитных пульсаций диапазона $Pc3$ на сети разнесенных по долготе приэкваториальных и низкоширотных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ в начальную фазу умеренной магнитной бури (5–7 апреля 2010 г.). Полученные результаты сопоставлены с магнитными наблюдениями на среднеширотной обс. Chambon-la-Forêt (CLF) и субавроральной обс. Kerguelen (PAF), а также с наблюдениями на 6-ти австралийских обсерваториях, расположенных на низких и средних широтах. Подробно исследовано два временных интервала: внезапное начало бури (SC) и начало большой глобальной суббури. В первом интервале максимальные амплитуды приэкваториальных пульсаций наблюдались в околополуденном секторе, а во втором – в околополуночном. Показано, что динамика спектральной структуры $Pc3$ пульсаций в рассмотренных событиях была различной, несмотря на то, что в обоих случаях в спектре $Pc3$ наблюдалось усиление волн в двух близких спектральных полосах: ~20–30 мГц и ~30–40 мГц. Рассмотренные $Pc3$ пульсации характеризовались очень маленькими волновыми азимутальными числами (0.5 и меньше). Обсуждаются возможные механизмы генерации наблюдаемых $Pc3$ пульсаций.

DOI: 10.7868/S0016794013030115

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2010 г. в ходе модернизации геомагнитных наблюдений на глобальной сети наземных обсерваторий проекта ИНТЕРМАГНЕТ была введена регистрация с 1-секундным разрешением на 6-ти приэкваториальных обсерваториях (PPT, IMP, MBO, AAE, PHU, LZN). Эти наблюдения были дополнены 1-с регистрацией на 6 австралийских обсерваториях, расположенных на низких и средних широтах в долготном секторе обс. PHU и LZN. Географическая карта расположения обсерваторий показана на рис. 1, а их географические и исправленные геомагнитные координаты приведены в таблице, где также показано мировое время местного геомагнитного полдня для каждой обсерватории. Помимо указанных выше обсерваторий, в данной работе также используются 1-с наблюдения на среднеширотной обс. Chambon-la-Forêt (CLF, $\varphi = 48.02^\circ$, $\lambda = 2.26^\circ$, $\Phi = 43.8^\circ$, $\Lambda = 80.24^\circ$, геомагнитный полдень в 11 UT) и субавроральной обс. Kerguelen (PAF, $\varphi = -49.35^\circ$, $\lambda = 70.20^\circ$, $\Phi = -57.90^\circ$, $\Lambda = 128.0^\circ$, геомагнитный полдень в 08 UT). Цифровая геомагнитная регистрация с 1-с разрешением позволяет исследовать характеристики геомагнитных пульсаций диапазона $Pc3$ ($f = 20\text{--}50$ мГц) как в средних, так и в приэкваториальных широтах. Таких исследований в глобальном по долготе масштабе ранее не проводилось.

Имеется большое число работ, посвященных исследованию среднеширотных $Pc3$ пульсаций. Колебания диапазона $Pc3$ на низких широтах также ранее обсуждались в литературе, например, [Зыбин и др., 1982; Yumoto and Saito, 1983; Ansari and Fraser, 1986; Yumoto, 1986; Waters et al., 1991; Sarma and Sastry, 1995; Pilipenko et al., 1998; Roy and Rao, 1998; Menk et al., 2000; Ndiitwani and Sutcliffe, 2009]. В работе [Зыбин и др., 1982], основанной на наблюдениях в южной Индии, впервые показано усиление амплитуд $Pc3$ колебаний на экваториальных широтах по сравнению с низкоширотной станцией, удаленной от экватора всего на 7° . В противоположность этому типичные ночные геомагнитные пульсации $Pi2$, по данным этих авторов, не испытывали экваториального усиления амплитуд.

Результаты исследования $Pc3$ пульсаций на экваториальных широтах на 4-х станциях, расположенных в небольшом долготном секторе на Филиппинах ($192\text{--}208^\circ$), были опубликованы в работе [Cardinal and Yumoto, 2009]. Цифровая регистрация проводилась с помощью индукционных магнитометров с дискретизацией в 1 с, затем для выделения $Pc3$ пульсаций применялось 3-х секундное осреднение и фильтрация в полосе 22–50 мГц. Было установлено, что, как и в низких широтах, вблизи экватора амплитуда $Pc3$ пульсаций возрастает в дневные часы местного времени (08–15 LT) с мак-

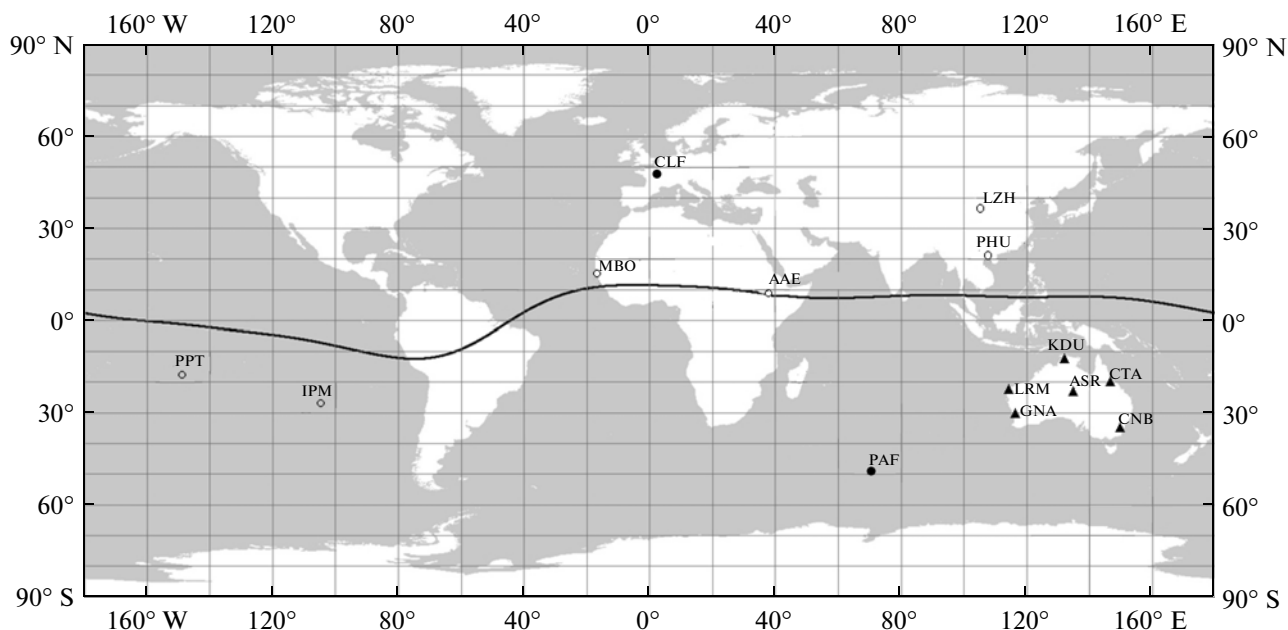


Рис. 1. Географическая карта положения используемых обсерваторий INTERMAGNET (кружки – приэкваториальные обсерватории, треугольники – австралийские).

симумом вблизи полдня, что традиционно объяснялось влиянием экваториального электроджета [Sarma and Sastry, 1995]. Однако результаты исследований Cardinal and Yumoto [2009] показали низкую корреляцию амплитуды $Pc3$ пульсаций с интенсивностью экваториальной электроструи и проводимостью Каулинга, особенно в зимний период. Авторы указанной выше работы пришли к выводу, что наблюдаемые ими на экваторе $Pc3$ пульсации имели внемагнитосферное происхождение и были вызваны возбуждением волн за счет отраженных от магнитосферы протонов солнечного ветра [Russell and Hoppe, 1983; Yumoto, 1986].

Целью данной работы был анализ 1-с геомагнитных наблюдений на сети разнесенных по долготе приэкваториальных и низкоширотных обсерваторий ИНТЕРМАГNET в начальную фазу умеренной магнитной бури (5–7 апреля 2010 г.) нового цикла солнечной активности. Для анализа было выбрано два интервала: внезапное начало бури SC (удар по дневной магнитосфере) и начало большой глобальной суббури, наблюдающейся через полчаса после SC (“удар” с ночной стороны магнитосферы). Были исследованы спектральные характеристики геомагнитных пульсаций диапазона $Pc3$ ($f = 20–50$ мГц).

Географические и геомагнитные координаты обсерваторий

Обсерватории	Координаты, град				Геомаг. полдень, UT	MLT на 09 UT
	географические		геомагнитные			
PPT	-17.57	210.43	-16.13	284.37	21	00
IPM	-27.70	250.78	-20.26	327.10	18	03
MBO	14.38	343.03	04.05	58.50	13	08
AAE	09.03	38.77	05.22	111.39	09	12
PHU	21.03	105.95	13.72	177.53	05	16
LZH	36.08	103.85	23.65	175.71	05	16
KDU	-12.69	132.47	-22.40	204.50	03	18
STA	-20.10	146.30	-29.60	220.20	02	19
LRM	-22.22	114.10	-33.60	185.10	05	16
ASP	-23.77	133.88	-34.50	206.90	03	18
GNA	-31.80	116.00	-44.40	186.00	05	16
CNB	-35.32	149.36	-45.80	225.60	02	19

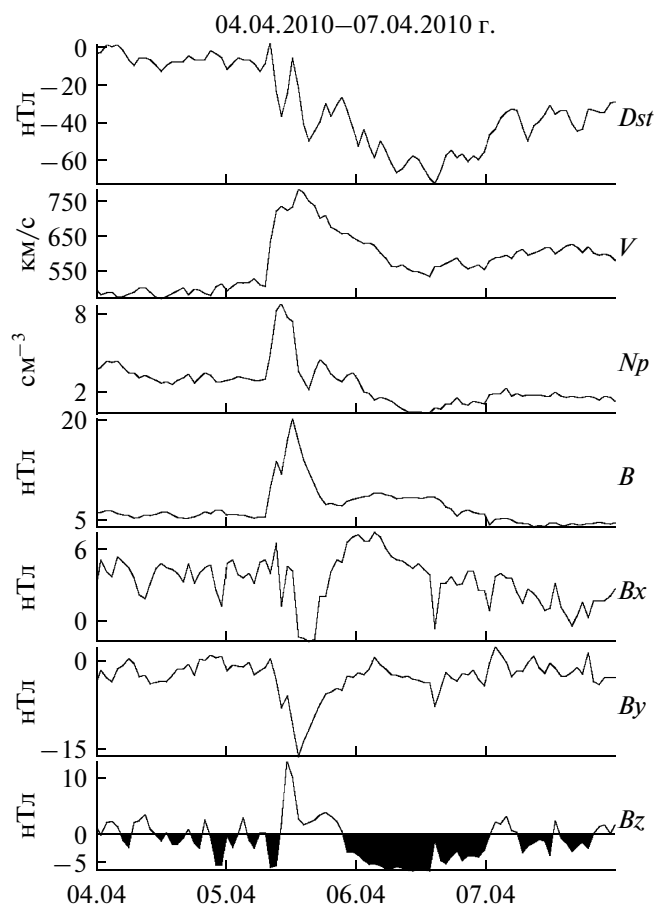


Рис. 2. Вариации параметров солнечного ветра и ММП и *Dst* индекса (часовые значения) во время магнитной бури 5–7 апреля 2010 г.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

5–7 апреля 2010 г. на Земле наблюдалась небольшая магнитная буря с минимальным значением *Dst* индекса около -50 нТл (6 апреля), вызванная приходом к магнитосфере выброса солнечного волокна, сопровождаемого выбросом коронального вещества. Межпланетная ударная волна была зарегистрирована на Земле 5 апреля 2010 г. в 08.26 UT, как внезапное начало (*SC*) магнитной бури. Вариации параметров солнечного ветра (скорость и плотность) и межпланетного магнитного поля (ММП), а также *Dst* индекса во время обсуждаемой бури показаны на рис. 2. Эта магнитная буря началась на фоне предшествующих геомагнитных возмущений с *Kp* до ~ 4 и небольших отрицательных значений *Dst* индекса и компоненты *Bz* ММП при достаточно высокой скорости солнечного ветра (~ 500 км/с), поэтому, несмотря на небольшие значения *Dst* индекса во время бури наблюдались значительные геомагнитные возмущения.

После *SC* скорость солнечного ветра возросла до 750–800 км/с. Примерно через полчаса после

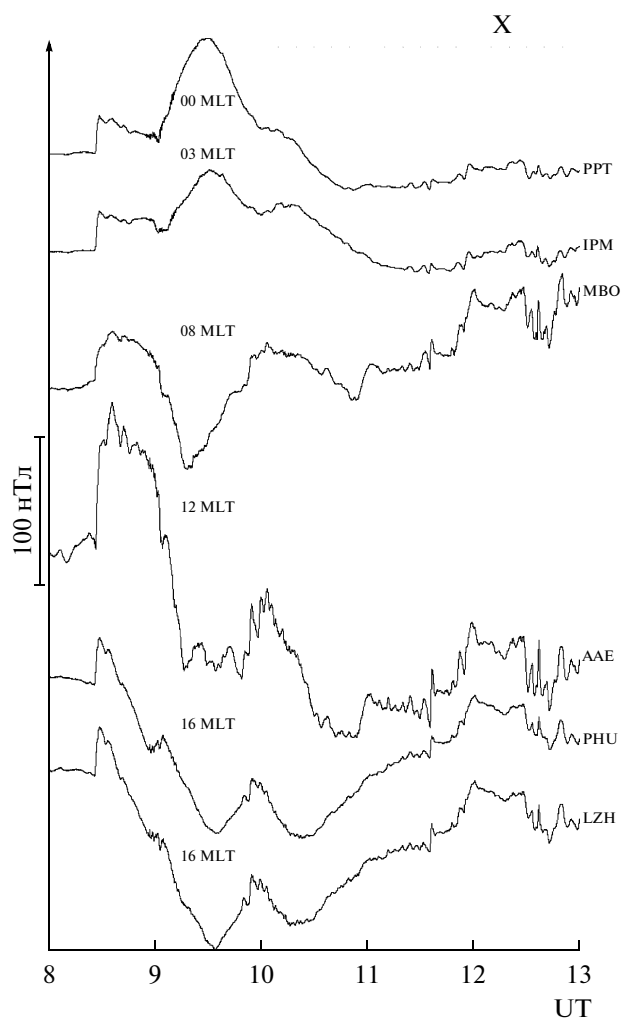


Рис. 3. Магнитограммы экваториальных станций в начальную фазу обсуждаемой бури.

SC в магнитосфере Земли началась очень интенсивная (*AE*-индекс до ~ 2500 нТл) суббури, наблюдаемая в глобальном масштабе [Kozyreva, 2012; Kozyreva and Kleimenova, 2012], наиболее сильная в вечернем секторе авроральных широт. Начало суббури сопровождалось интенсивным всплеском *Pi2* и *Pi3* пульсаций в вечернем и ночном секторах авроральных широт и ярким брейкапом сияний в 09.03 UT [Kozyreva, 2012].

На рисунке 3 показаны магнитограммы обсуждаемых в данной статье экваториальных обсерваторий во время начальной фазы этой бури. Во время *SC* обсерватории PPT и IPM находились в ночном секторе, обс. MBO в утреннем, AAE — в полуденном, а PHU и LZH в послеполуденном. Наибольший скачок магнитного поля во время *SC* (~ 100 нТл) отмечался в околополуденном секторе (обс. AAE), что является типичным для *SC*, например, [Rastogi, 1993]. В 09 UT началась глобальная магнитосферная суббури, которая наблюдалась на экваториальных широтах, как отрица-

тельное бухтообразное возмущение в дневном секторе и положительное в ночном (обс. IMP, PPT), что может быть результатом переноса электрического поля из авроральных широт в экваториальные, как неоднократно обсуждалось в литературе, например, [Kikuchi and Araki, 1979; Somayajulu et al., 1987].

Для анализа $Pc3$ пульсаций данные наблюдений были отфильтрованы в полосе 20–50 мГц с помощью фильтра Баттерворда 6-го порядка [Rabiner, 1986]. Полученные результаты показаны на рис. 4. Видно, что амплитуда всплеска $Pc3$ колебаний во время SC была значительно больше на дневной стороне (обс. AAE), чем на ночной (обс. PPT). Однако во время начала сильной магнитосферной суббури в 09 UT амплитуда нового всплеска $Pc3$ пульсаций, в отличие от первого, в дневном и ночном секторах была одного порядка. Рассмотрим оба эти всплеска подробнее.

На рисунке 5 показаны амплитудные спектры этих двух всплесков $Pc3$ геомагнитных пульсаций: во время SC, в 08.20–08.40 UT (рис. 5а), и во время начала ночной суббури после SC, в 09.00–09.20 UT (рис. 5б). На верхних графиках показаны спектры колебаний на экваториальных обсерваториях, на средних графиках – в среднеширотной обс. CLF, находящейся в это время в предполуденном секторе, и околополуденной субавроральной обс. PAF, а на нижних графиках – на австралийских низко- и среднеширотных обс. KDU, ASP и CNB, а также в обс. PNU и LZH, расположенных в том же долготном секторе в северном полушарии.

$Pc3$ колебания во время SC. В дневном секторе приэкваториальных широт (рис. 5а, верхний график) в спектре $Pc3$ пульсаций можно выделить усиление волн в двух диапазонах частот (~19–26 и ~29–38 мГц), амплитуда первого, более низкочастотного максимума была выше, чем второго. Максимум во второй полосе частот четко виден и в спектре пульсаций в обс. CLF (10 MLT) и PAF (13 MLT) с амплитудой почти вдвое большей, чем вблизи экватора (рис. 5а, средний график). Возрастание амплитуды колебаний на частотах ниже 25 мГц в околополуденном секторе экваториальных, средних и субавроральных широт, вероятно, является отражением наблюдаемых в это время в дневном секторе магнитосферы геомагнитных пульсаций $Pc4$ [Kozyreva, 2012].

Примерно такие же диапазоны частот можно выделить и в колебаниях в вечернем секторе на австралийских обсерваториях, при этом амплитуда колебаний в приэкваториальной обс. PNU больше, чем в низких и средних широтах. Такой эффект экваториального возрастания амплитуд $Pc3$ пульсаций ранее был показан в работе [Зыбин и др., 1982]. Регистрируемая в это время большая амплитуда низкочастотной полосы волн в обс. CNB (~19 MLT), по-видимому, является результатом распространения в вечерний сектор высокочастотного продолжения геомагнитных

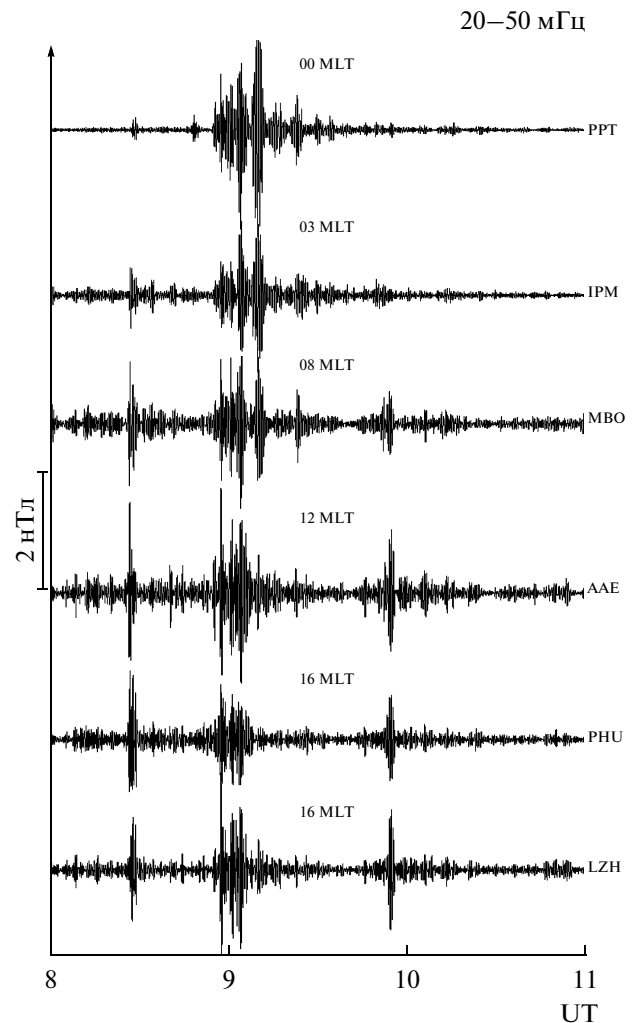


Рис. 4. Отфильтрованные в полосе 20–50 мГц магнитограммы экваториальных станций.

пульсаций диапазона $Pi2$, наблюдаемых в это время в предполуденном секторе [Kozyreva, 2012].

Анализ фазовых сдвигов $Pc3$ пульсаций на приэкваториальных обсерваториях показал, что фаза волн в ААЕ (полдень) опережает фазу волн в IMP (03 MLT) на 6 с и на 2 с в PNU (16 MLT), что свидетельствует об очень малых (~0.5) значениях азимутального волнового числа колебаний, при этом фазовая скорость распространения волн очень большая (~2000 км/с).

$Pc3$ колебания во время начала ночной суббури. Начало огромной суббури, сопровождаемое резким уярчением полярных сияний в вечернем секторе Земли и всплесками геомагнитных пульсаций $Pi2$ – $Pi3$ [Kozyreva, 2012], привело и к генерации глобального по долготе интенсивного всплеска $Pc3$ пульсаций на приэкваториальных широтах (рис. 4), спектр которых приведен на рис. 5б (верхний график). В отличие от предыдущего случая, в данном событии амплитуда пульсаций в полосе частот 22–27 мГц в ночном секторе (обс. PPT и

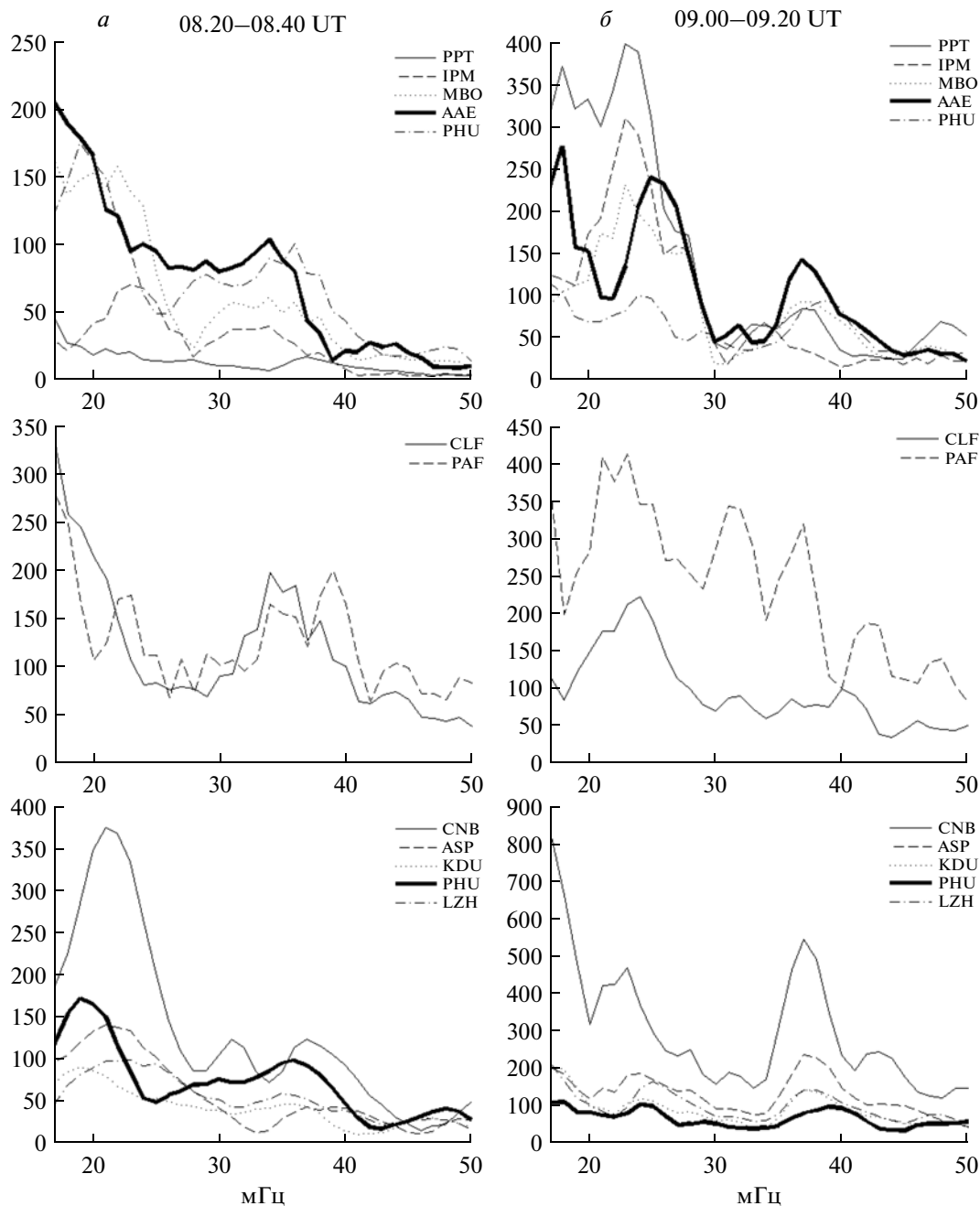


Рис. 5. Спектры $Pc3$ пульсаций в относительных единицах: *a* – во время SC (08.20–08.40 UT), *б* – во время начала интенсивной глобальной суббури (09.00–09.20 UT)

IPM) почти вдвое превышала амплитуду подобных колебаний в околополуденном секторе (обс. MBO и AAE). Однако в полосе 35–42 мГц амплитуда $Pc3$ колебаний была наибольшей вблизи геомагнитного полдня (обс. AAE), как и в предыдущем случае.

В спектре колебаний в субавроральной обс. PAF видны несколько пиков, которые можно рассматривать как гармоники колебаний в полосе 20–25 с. В средних широтах, как и на экваторе,

низкочастотный максимум (22–27 мГц) был почти вдвое больше высокочастотного.

В вечернем секторе (нижний график на рис. 5б) в средних, низких и приэкваториальных широтах наблюдалась обратная картина – амплитуда высокочастотных (35–41 мГц) колебаний была несколько больше низкочастотных (22–27 мГц). Колебания в полосе 35–41 мГц на всех обсерваториях наблюдались одновременно (с точностью до 1 с) с максимумом амплитуды в обс. CNB

(~ 19 MLT), т.е. их волновое азимутальное число было близко к нулю.

Таким образом, анализ всплесков $Pc3$ пульсаций в приэкваториальных и низких широтах показал, что, несмотря на некоторое сходство частотных полос, их пространственное распределение в двух рассмотренных событиях было различным.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в некоторых работах, например, [Шотт и др., 2004], источники и механизмы генерации геомагнитных пульсаций $Pc3$ ($f = 20\text{--}50$ мГц) и $Pc4$ ($f = 7\text{--}20$ мГц) могут быть различными. Несмотря на это, первичным источником этих волн считается турбулентная область перед фронтом ударной волны, где происходит возбуждение волн (upstream wave) пучками отраженных протонов на фронте ударной волны при ориентации силовых линий ММП вдоль паркеровской спирали [Russell and Norpe, 1983]. При этом частота возбуждаемых волн попадает в диапазон $Pc3\text{--}4$ и связана с величиной B ММП простым соотношением: $f \sim 6B$, где f в мГц, а B – в нТл. Модельные расчеты [Krauss-Varban, 1994] показали, что волны сжатия, генерируемые пучками отраженных протонов, проходят вглубь магнитосферы без существенного изменения спектрального состава. Эти волны, распространяясь вглубь магнитосферы могут приводить к возбуждению резонансных колебаний на L -оболочках, где собственная резонансная частота совпадает с частотой волны внешнего источника.

Именно с таким внемагнитосферным источником связывалась генерация $Pc3$ пульсаций, наблюдаемых на экваториальных широтах, в работе [Cardinal and Yumoto, 2009]. Однако в нашем случае, вероятно, это не так, поскольку величина B ММП во время генерации обсуждаемых в данной работе $Pc3$ пульсаций составляла порядка $14\text{--}18$ нТл (рис. 2). При таких величинах B ММП частота upstream wave будет втрое больше наблюдаемых нами $Pc3$ пульсаций.

Наблюдаемые $Pc3$ пульсации также не могут быть объяснены возбуждением в экваториальной ионосфере гиротропных волн за счет неоднородностей экваториальной электроструи, как это рассматривалось в работах [Сорокин и Федорович, 1982; Fedorov et al., 1999]. По данным этих работ скорость гиротропных волн в диапазоне $Pc3$ в ионосфере составляет $\sim 20\text{--}100$ км/с, а в обсуждаемых событиях она почти на два порядка выше.

Теоретические и экспериментальные исследования $Pc3$ пульсаций на низких широтах показали, например, [Pilipenko et al., 1998; Menk et al., 2000], что на геомагнитных широтах ниже 30° наблюдается ухудшение добротности резонансных колебаний с уменьшением широты за счет того, что на этих широтах значительная часть силовой линии оказывается погруженной в ионосферную плазму. При этом отмечается аномальный ход ре-

зонансного периода: с уменьшением широты период не уменьшается, а увеличивается с $12\text{--}14$ с на геомагнитных широтах порядка 30° до $20\text{--}22$ с (~ 50 мГц) на широтах порядка 20° . На более низких широтах таких исследований не проводилось.

Если бы наблюдаемые нами в приэкваториальных широтах $Pc3$ пульсации были бы результатом развития резонанса на низких широтах, то их частоты должны быть значительно выше. Согласно оценкам [Нишида, 1980] частота волн порядка 30 мГц (период около 30 с) характерна для резонансных колебаний на геомагнитных широтах порядка 50° , т.е. недалеко от обс. CLF ($\Phi \sim 44^\circ$) и CNB ($\Phi \sim 46^\circ$). В нашем случае для диапазона частот $\sim 30\text{--}40$ мГц это вполне реально.

Анализ данных наблюдений показал, что в случае возбуждения $Pc3$ пульсаций во время SC в спектре колебаний (рис. 5а) наблюдалось усиление волн в достаточно широкой полосе частот, порядка $30\text{--}40$ мГц. Можно предположить, что возбуждение резонансных колебаний, вызванное резким сжатием магнитосферы во время SC , происходило в некоторой области L -оболочек, соответствующей близким, но несколько отличным частотам. Наблюдаемый спектр волн, по-видимому, был сформирован суперпозицией колебаний разных источников, распределенных по L -оболочкам.

Спектр дневных $Pc3$ пульсаций, наблюдаемых во время начала ночной суббури (рис. 5б), в отличие от $Pc3$ во время SC , стал более узким, с одинаковым максимумом на частоте ~ 37 мГц на всех дневных экваториальных обсерваториях и в субавроральной обс. PAF. На предполуденной (10 MLT) среднеширотной обс. CLF эти колебания практически не наблюдались, несмотря на то, что они регистрировались на близких геомагнитных широтах в вечернем секторе (обс. CNB). Можно предположить, что наблюдаемый спектральный максимум является одной из гармоник $Pi2$ фундаментальной частоты (plasmaspheric cavity mode resonance), например, [Lin et al., 1991; Cheng et al., 2000; Takahashi et al., 2003], генерирующиеся в ночном секторе в области развития аврорального брейккапа сияний на начале суббури.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнен анализ данных 1-секундных наблюдений геомагнитных пульсаций диапазона $Pc3$ на сети разнесенных по долготе приэкваториальных и низкоширотных обсерваторий INTERMAGNET в начальную фазу умеренной магнитной бури ($5\text{--}7$ апреля 2010 г.). Полученные результаты сопоставлены с магнитными наблюдениями на среднеширотной обс. Chambon-le-Forêt (CLF) и субавроральной обс. Kerquelen (PAF), а также с наблюдениями на 6-ти австралийских обсерваториях, расположенных на низких и средних широтах.

Подробно исследовано два временных интервала: внезапное начало бури (SC) и начало боль-

шой глобальной суббури. В первом интервале максимальные амплитуды приэкваториальных пульсаций наблюдались в околополуденном секторе, а во втором — в околополуденном.

Показано, что динамика спектральной структуры Pc3 пульсаций в рассмотренных событиях была различной, несмотря на то, что в обоих случаях в спектре Pc3 наблюдалось усиление волн в двух близких спектральных полосах: ~20–30 мГц и ~30–40 мГц. Все обсуждаемые Pc3 пульсации характеризовались очень маленькими волновыми азимутальными числами (0.5 и меньше).

Высказано предположение, что возбуждение обсуждаемых всплесков Pc3 геомагнитных пульсаций происходило за счет внутримангнитосферного механизма, а не генерации на фронте отраженных от магнитопаузы протонов. Дневные Pc3 могут быть результатом развития резонанса на средних широтах. Вечерние всплески Pc3 пульсаций могут быть гармониками Pi2 колебаний plasmaspheric cavity mode resonance, вызванных импульсом давления при диполизации или разрыва тока в хвосте магнитосферы во время начала (onset) суббури.

Представленные в статье результаты получены на основе данных, зарегистрированных на геомагнитных обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ. Мы благодарим национальные институты, обеспечивающие их работоспособность и продвижение высоких стандартов в области геомагнитных наблюдений (www.intermagnet.org).

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-05-00583 и № 12-05-90428-Укр_а, а также Программы № 7 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зыбин К.Ю., Моргунов В.А., Щепетнов Р.В. Особенности геомагнитных микропульсаций в экваториальной зоне Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 22. № 6. С. 1030–1032. 1982.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Распространение короткопериодных волн в ионосфере // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. 25. С. 455–507. 1982.
- Шотт Ж.Ж., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Амплитуды геомагнитных пульсаций Pc3 и Pc4 вблизи проекции плазмопаузы (обс. Кергелен) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 5. С. 616–623. 2004.
- Ansari I.A., Fraser B.J. A multi-station study of low latitude Pc3 geomagnetic pulsations // Planet. Space Sci. V. 34. Is. 6. P. 519–536. 1986.
- Cardinal M.G., Yumoto K. Characteristics of equatorial Pc3 pulsations // Proc. Inter. Conf. on Space Science and Communication. 26–27 October 2009, Port Dickson, Negeri Sembilan, Malaysia. P. 30–34. 2009.
- Cheng C.C., Chao J.K., Yumoto K. Spectral power of low-latitude Pi2 pulsations at the 210° magnetic meridian stations and plasmaspheric cavity resonances // Earth. Planets Space. V. 52. P. 615–627. 2000.
- Fedorov E., Pilipenko V., Surkov V., Rao D.R.K., Yumoto K. Ionospheric propagation of magnetohydrodynamic disturbances from the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 104. P. 4329–4336. 1999.
- Kikuchi T., Araki T. Horizontal transmission of the polar electric field to the equator // J. Atmos. Terr. Phys. V. 41. P. 927–936. 1979.
- Krauss-Varban D. Bow shock and magnetosheath simulations: Wave transport and kinetic properties // Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves. AGU, Washington D.C., ed. M. J. Engebretson, K. Takahashi, and M. Scholer. P. 121–134. 1994.
- Kozyreva O.V., Kleimenova N.G. Huge high latitude substorm associated with SC of the magnetic storm on 05 April 2010 // abs. 11th Intern. Conf. on Substorms, Lüneburg, Germany, Sept. 2–7, P. 69. 2012.
- Kozyreva O.V. Dynamics of the geomagnetic disturbances in the initial phase of the magnetic storm: Case study // Proc. Inter. Conf. Problems of Geocosmos, St-Peterburg, Russia, Oct. 8–12, 2012.
- Lin C.A., Lee L.C., Sun Y.J. Observations of Pi2 pulsations at very low latitude (L = 1.06) station and magnetospheric cavity resonances // J. Geophys. Res. V. 96 (A12). P. 21105–21113. 1991.
- Menk F.W., Waters C.L., Fraser B.J. Field line resonances and waveguide modes at low latitudes. 1. Observations // J. Geophys. Res. V. 105. P. 7747–7761. 2000.
- Ndiitwani D.C., Sutcliffe P.R. The structure of low-latitude Pc3 pulsations observed by CHAMP and on the ground // Ann. Geophys. V. 27. P. 1267–1277. 2009.
- Pilipenko V., Yumoto K., Fedorov E., Kurneva N., Menk F.W. Field line Alfvén oscillations at low latitudes // Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ. Ser. D. Earth Planet. Sci. V. 30. № 1. P. 23–43. 1998.
- Rabiner L.R.B. Gold Theory and Application of Digital Signal Processing. Paramus, NJ: Prentice-Hall. ISBN 0-13-914101-4, 1986.
- Rastogi R.G. Longitudinal variation of sudden commencement of geomagnetic storm at equatorial stations // J. Geophys. Res. V. 98 (A9). P. 15411–15416. 1993.
- Roy M., Rao D.R.K. Frequency dependence of equatorial electrojet effect on geomagnetic micropulsations // Earth Planets Space. V. 5. P. 847–851. 1998.
- Russell C.T., Hoppe M.M. Upstream waves and particles // Space Sci Rev. V. 34. № 2. P. 155–172. 1983.
- Sarma S.V.S., Sastry T.S. On equatorial electrojet influence on geomagnetic pulsation amplitudes // J. Atmos. Terr. Phys. V. 57. № 7. P. 749–754. 1995.
- Somayajulu V.V., Reddy C.A., Viswanathan K.S. Penetration of magnetospheric convective electric field to the equatorial ionosphere during the substorm of March 22, 1979 // Geophys. Res. Lett. V. 14. P. 876–879. 1987.
- Takahashi K., Anderson R.R., Hughes W.J. Pi2 pulsations with second harmonic: CRRES observations in the plasmapause // J. Geophys. Res. V. 108 (A5). 1242. doi:10.29/2002JA009747/ 2003.
- Waters C.L., Menk F.W., Fraser B.J. The resonance structure of low latitude field line resonances // Geophys. Res. Lett. V. 18. P. 2293–2296. 1991.
- Yumoto K., Saito T. Relation of compressional HM waves at GOES 2 to low-latitude Pc3 magnetic pulsations // J. Geophys. Res. V. 88. P. 10041–10052. 1983.
- Yumoto K. Generation and propagation mechanisms of low-latitude magnetic pulsations- A review // J. Geophys. V. 60. P. 79–105. 1986.