

УДК 550.385.37

# ПРОЯВЛЕНИЯ ВНЕЗАПНОГО НАЧАЛА БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 20 НОЯБРЯ 2003 г. В ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСА SC, ПУЛЬСАЦИЙ PSC И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ ЯРКОСТИ АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ

© 2004 г. Д. Г. Баишев<sup>1</sup>, Г. В. Борисов<sup>1</sup>, В. А. Величко<sup>1</sup>, С. И. Соловьев<sup>1</sup>, К. Юмото<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск<sup>2</sup>Университет Кюсю, Фукуока (Япония)

Поступила в редакцию 19.05.2004 г.

Приведены результаты исследования геомагнитного и аврорального отклика до начала магнитной бури 20.XI.2003 г. Установлено, что начало SC привело к уярчению дуги сияний в вечернем секторе в течение ~2–3 мин с продвижением конца дуги на восток со скоростью 10–20 км/с и смещением дуги к полюсу со скоростью ~1.0 км/с. Далее наблюдались кратковременные (~5 мин) броски сияний к полюсу до ~2–4°, посторяющиеся через 5–10 мин в течение ~40 мин, что привело к пространственной модуляции яркости свечения и генерации пульсаций  $P_{SC}$  с подобными периодами колебаний. Расширение сияний к полюсу имело скачкообразный характер – с образованием новых дуг полярнее предыдущих со скоростью ~5 дуг в течение ~1.5 мин. Модуляция яркости свечения и  $P_{SC}$  наблюдались на фоне усиления двухвихревой токовой системы типа DP2 и сопровождались многократными переворотами  $B_z$  ММП с юга на север и обратно. Предполагается, что источником  $P_{SC}$  являлась модуляция интенсивности ионосферных токов DP2 в результате вариаций уровня магнитосферной конвекции.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–3], что при взаимодействии резких неоднородностей солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли на дневной стороне генерируется внезапный геомагнитный импульс (SC или SI), возбуждаются геомагнитные пульсации типа  $P_{SC}$ , а на ночной стороне может начаться магнитосферная суббуря. Пульсации  $P_{SC}$  возбуждаются как в низкочастотной ( $T \geq 10$ –15с), так и в высокочастотной области ( $T \leq 1$ с) и имеют достаточно большое разнообразие колебаний, как подобных регулярным низкочастотным пульсациям  $P_{c3}$ ,  $P_{c4}$  и  $P_{c5}$ , так и отличающихся от них своей иррегулярной формой. Механизмы возмущения  $P_{SC}$  остаются до конца не исследованными. Как отмечается в работе [4] остаются до конца не решенными и вопросы, касающиеся причин отклика ночной магнитосферы на резкое сжатие магнитосферы СВ.

В данной статье изучаются свойства  $P_{SC}$  и характеристики возмущений в ночной магнитосфере во время начала экстремальной бури в 08.03 UT 20 ноября 2003 г. с целью сравнительного анализа особенностей геомагнитного отклика на начало SC, во время другой экстремальной бури, начавшейся в 06.11 UT 29 октября 2003 г. [4].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

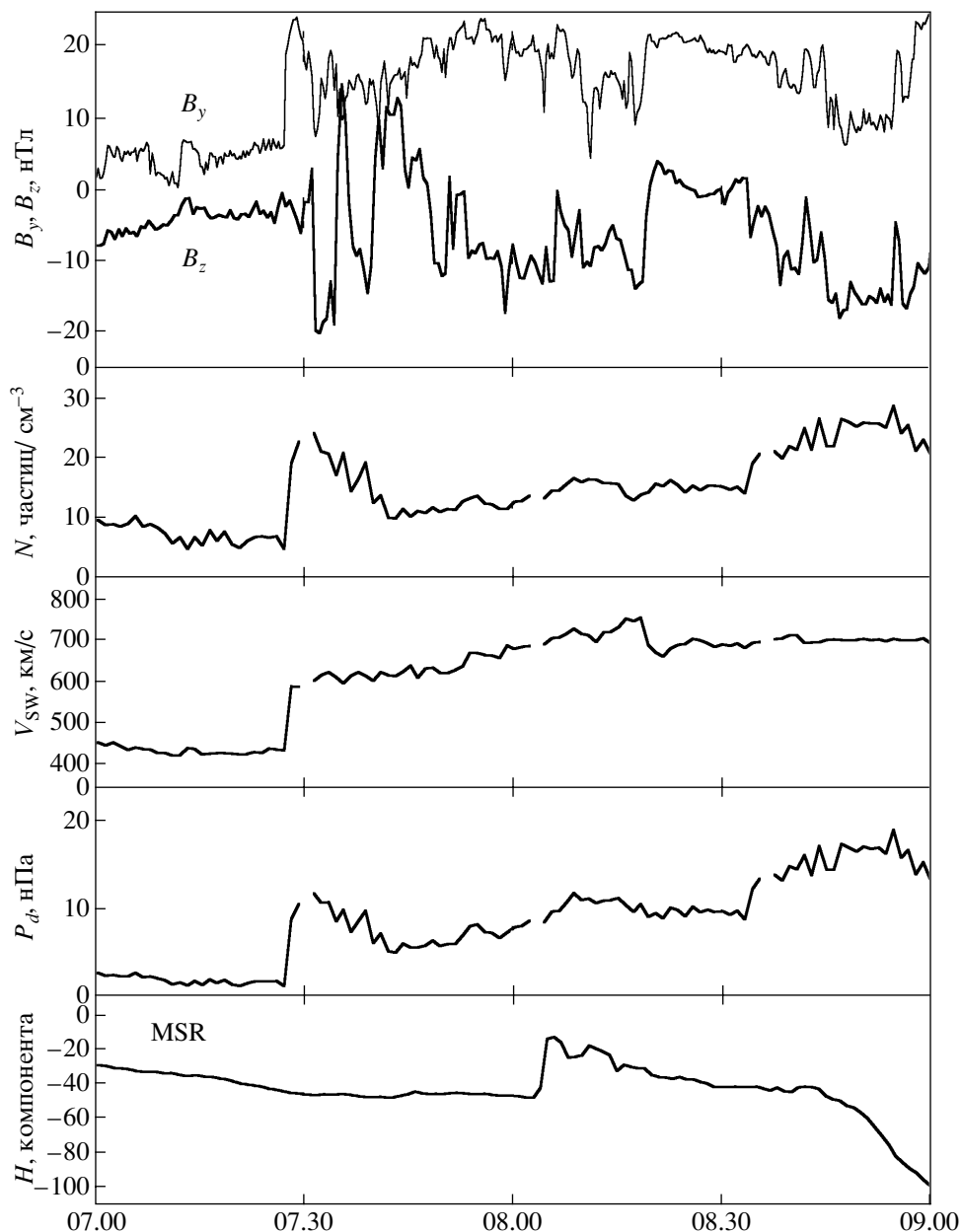
Для исследования наземного геомагнитного отклика использовались цифровые данные с раз-

решением 1–20 сек станций проектов CPMN, IMAGE и CANOPUS. Начало SC на 190° ММ в секторе ~16 MLT и пульсации  $P_{SC}$  с  $T \approx 5$ –10 мин сравнивались с пространственно-временными вариациями интенсивности аврорального свечения по данным телевизионных наблюдений сияний в б. Тикси (ТИХ,  $\Phi' = 65.6^\circ$ ,  $\Lambda' = 196.9^\circ$ ) на камере всего неба с 4-с разрешением. Магнитосферный отклик изучался по данным геостационарного спутника GOES-10 и спутника Wind, находившихся в ночной части хвоста магнитосферы на расстоянии ~6  $R_E$  и ~212  $R_E$  от Земли, соответственно. Временное разрешение данных спутников ~60 с.

Условия в солнечном ветре анализировались по данным спутника ACE (рис.1) с координатами ( $X_{GSE} = 240.24 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 26.47 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -9.23 R_E$ ). На рис.1 приведены вариации  $B_y$ ,  $B_z$  – компонент ММП, скорости, плотности и динамического давления солнечного ветра ( $P_d$ ) с 07.00 до 09.00 UT и  $H$ -компоненты магнитного поля на Земле по данным низкоширотной станции MSR ( $\Phi' = 37.6^\circ$ ,  $\Lambda' = 213.2^\circ$ ), расположенной на ~16–18 MLT меридиане.

## 2. НАЗЕМНЫЙ ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК НА ВАРИАЦИИ $P_d$ И ПАРАМЕТРОВ ММП

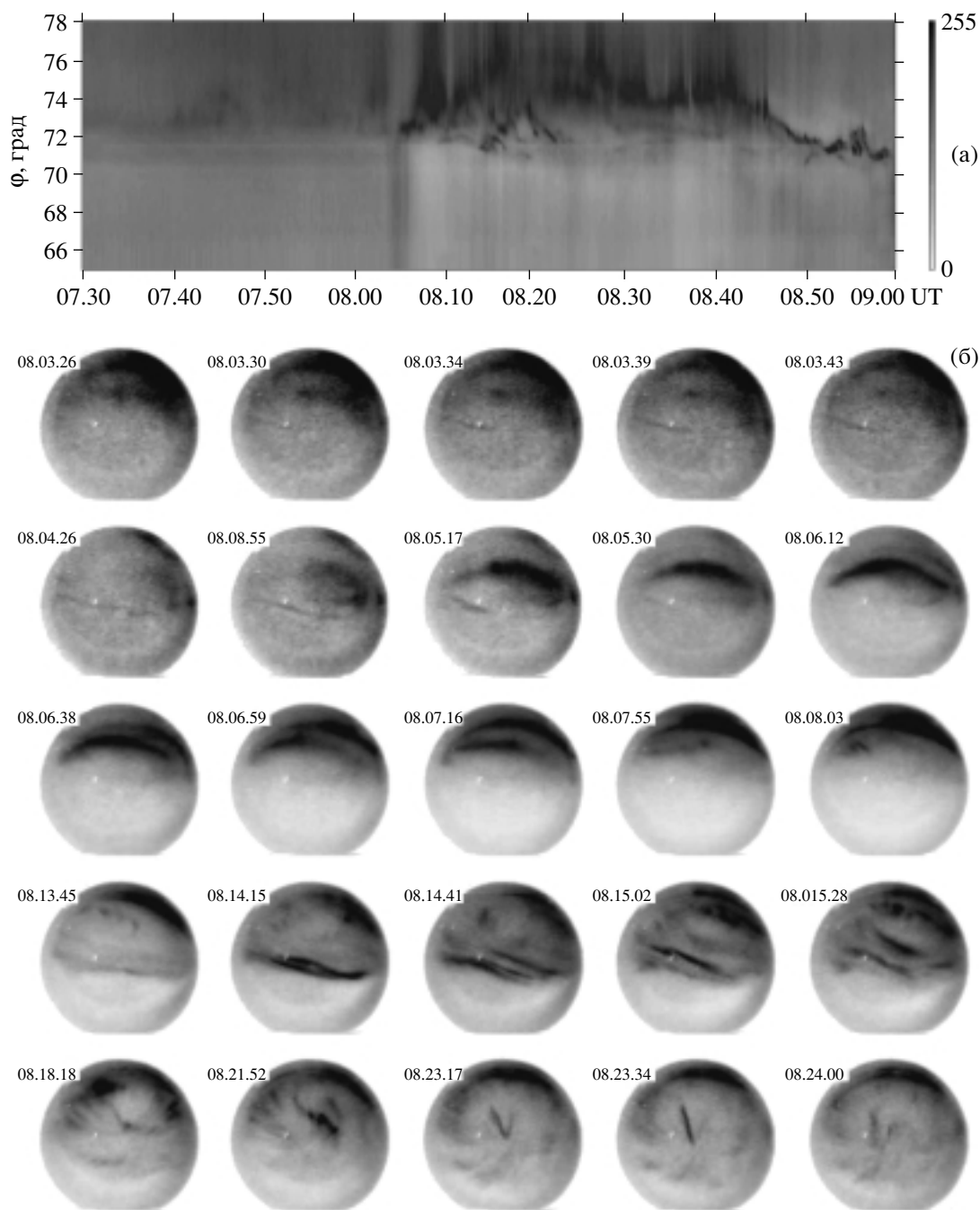
На рис. 2 (а) и (б) приведены кеограмма аврорального свечения по направлению север-юг и телевизионные кадры сияний на ст. Тикси с 07.30 до 09 UT (16–18 MLT). Из рис. 2 видно, что начало SC в 08.03 UT привело к уярчению дуги сияний и ее



**Рис. 1.** Вариации параметров солнечного ветра по данным спутника ACE и  $H$ -компоненты низкоширотной станции MSR ( $\Phi' = 37.6^\circ$ ,  $\Lambda' = 213.2^\circ$ ) во время SC 29X1.2003 г. с началом в  $\sim 08.03$  UT.

смещению к полюсу в 08.05–08.06 UT со скоростью  $\sim 1$  км/с с последующим кратковременным расширением сияний к полюсу со скоростью  $\sim 3.0$  км/с до  $\sim 08.10$  UT. Подобные кратковременные броски сияний к полюсу до  $\sim 2$ – $3$  градусов по меридиану повторялись до  $\sim 08.40$  UT с квазипериодичностью  $\sim 5$ – $10$  мин, что привело к пространственно-временной модуляции яркости свечения. По данным ТВ кадров сияний (первые 5 кадров) видно, что конец уярчившейся дуги с начала SC распространяется с запада на восток через зенит станции наблюдения. Оценка скорости распрост-

ранения дает значения  $\sim 10$ – $20$  км/с. Последующие серии кадров (вторая и третья строка) иллюстрируют характер расширения сияний к полюсу, с образованием новых дуг севернее предыдущей. Особенно ярко этот эффект образования новых дискретных структур виден в период с 08.13.45 до 08.15.28 UT (четвертая строка). Такое развитие сияний к полюсу является типичным в периоды формирования авроральной выпуклости [5]. После вспышки сияний может происходить формирование  $N$ – $S$  структур, вытянутых вдоль меридиана в течение нескольких десятков секунд (см. по-



**Рис. 2.** Кеогрaмма аврoрaльного свeчeния (a) и телевизионные кадры сияний ст. Тикси ( $\Phi' = 65.6^\circ$ ,  $\Lambda' = 196.9^\circ$ ) (б).

следние три кадра в пятой строке) и усиление диффузного свечения по всему небу.

Пространственно-временная модуляция яркости свечения с  $T \approx 5-10$  мин сопровождалась возбуждением геомагнитных пульсаций типа  $P_{SC}$  с подобными периодами колебаний и максимальной интенсивностью в Тикси и Чокурдах (рис. 3 и 4).

На рис. 3 и рис. 4 показаны вариации  $H$ -компоненты поля до и после SC в вечернем, утреннем

секторах на  $\Phi' \sim 65-67^\circ$  (рис. 3) и в предполуночном секторе на широтах от  $\Phi' \sim 61^\circ$  (PIN) до широт полярной шапки ( $\Phi' \sim 83^\circ$ ) (RE) – рис. 4. По данным рис. 2a и рис. 3 до начала SC в  $\sim 07.40$  UT было зарегистрировано усиление диффузного свечения к северу от Тикси и отмечался рост интенсивности восточной электроструи в вечернем секторе на ст.Тикси, Чокурдах, Зырянка (ZYK) и западной электроструи на о. Котельный (KTN),

20.XI.2003 г.

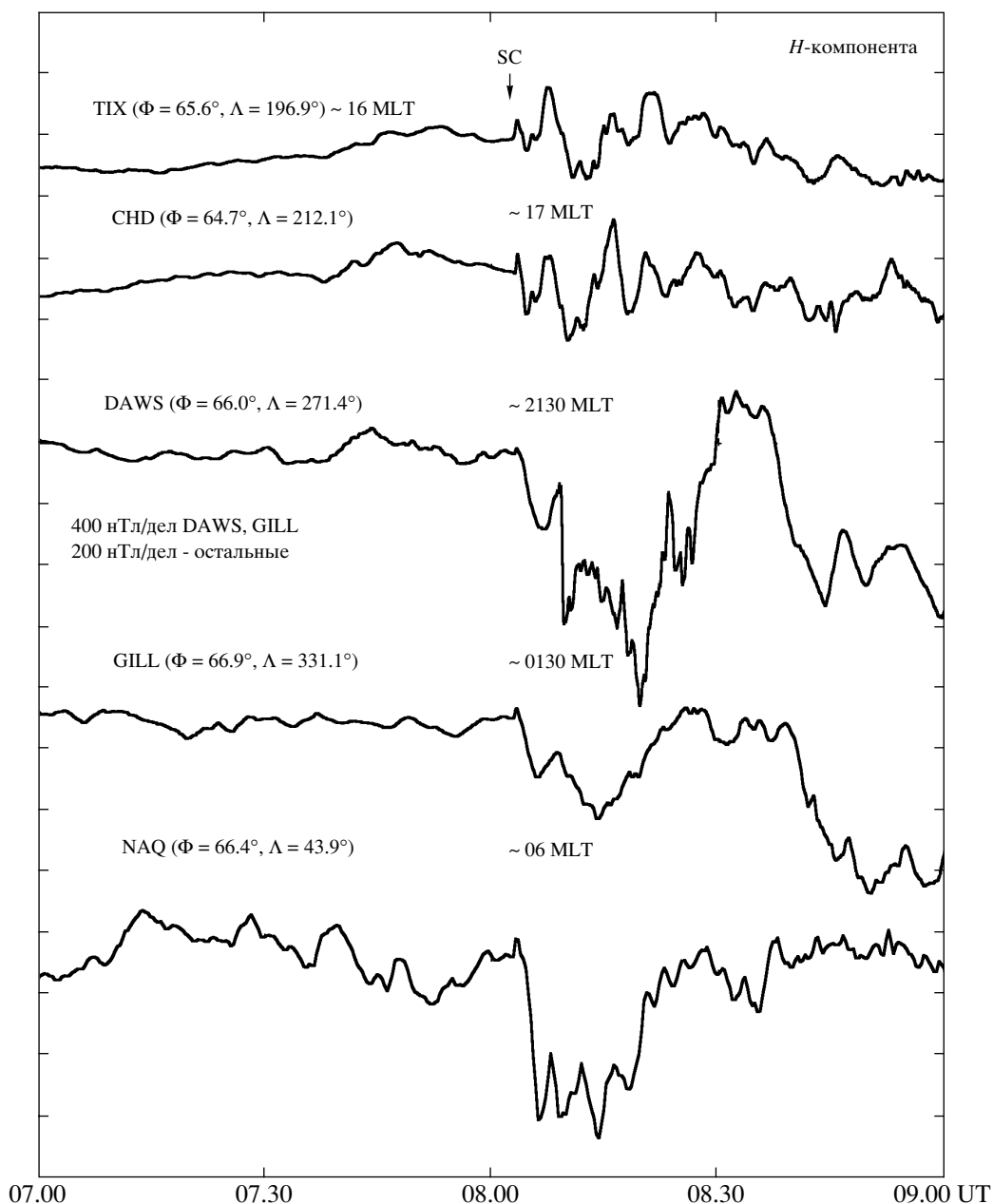


Рис. 3. Вариации *H*-компоненты магнитного поля на высоких широтах ( $\Phi' \sim 61\text{--}70^\circ$ ). Стрелкой отмечено начало SC.

а в утренние часы наблюдалось усиление западной электроструи (NAQ) – рис. 3. Интенсивность электроструй резко возросла после начала SC в вечерние, утренние часы (рис. 3) и наблюдалось усиление западной электроструи в предполуденном секторе на широтах  $61\text{--}67^\circ$  (DAW – рис. 3, PIN, ISL, GIL – рис. 4) и восточной электроструи на широтах  $\geq 74^\circ$  (BL, CB, TAL, RE) – рис. 4. Интенсивность западной электроструи составила по  $\Delta H \leq 1000$  нТл и как показали вариации вертикальной (*Z*) компоненты поля расширения запад-

ной электроструи к полюсу в предполуденном секторе не превышало  $1\text{--}2^\circ$ .

Таким образом, внезапное сжатие магнитосферы солнечным ветром и начало SC, вероятно, привело к усилению DP2 токовой системы, что согласуется с результатами [6].

На рис. 5. приведены диаграмма пространственно-временного распределения аврорального свечения в TIX, пульсации  $P_{SC}$  в TIX, CHD и ZYK, отфильтрованные записи в диапазоне пульсаций  $P_{i2}$  на станции MSR и вариации компонент ММП

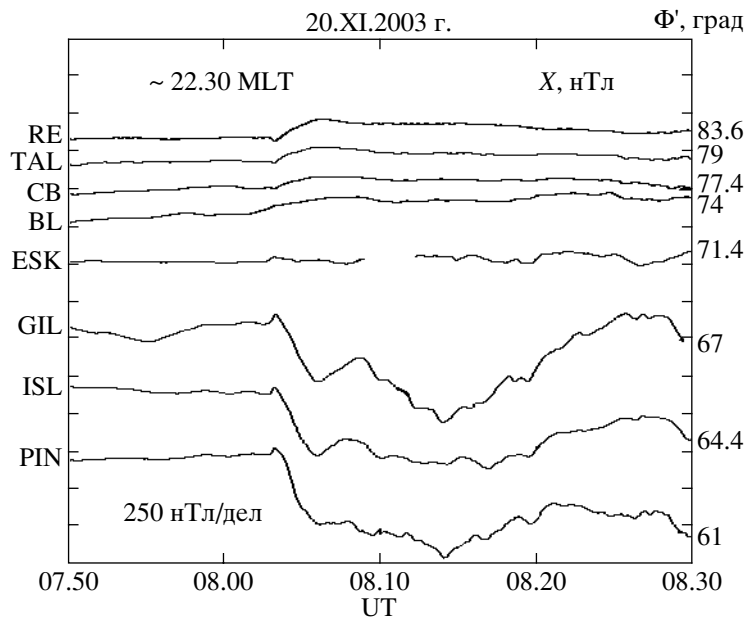


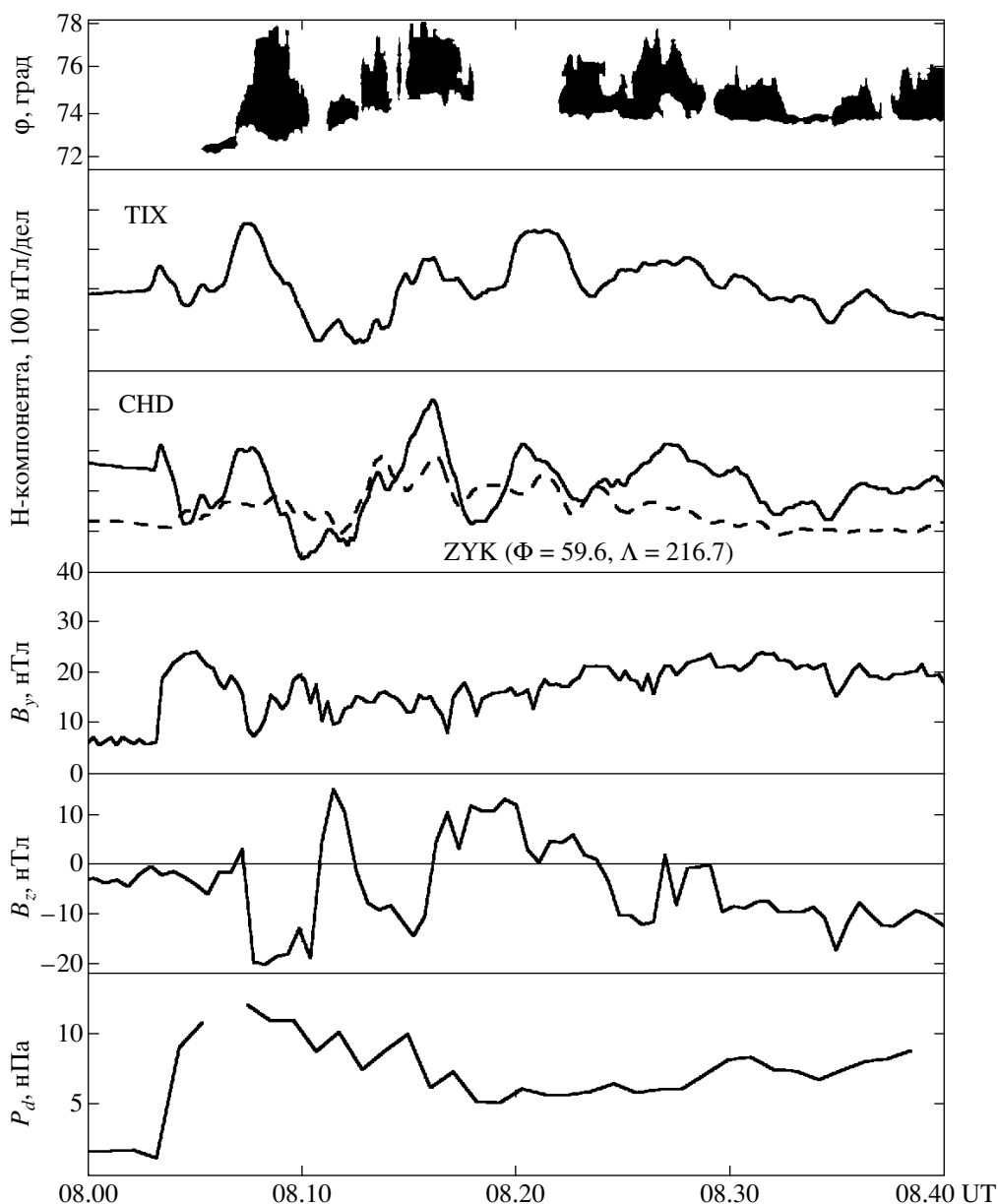
Рис. 4. Широтные вариации  $X$ -компоненты в предполуденном секторе по данным CANOPUS.

и  $P_d$  с 08.00 до 08.40 UT. Сравнение  $P_{SC}$  в Тикси с вариациями яркости аврорального свечения показывают, что положительные импульсы  $\Delta H$   $P_{SC}$  примерно соответствуют по времени появлению “языков” свечения к северу от Тикси, т.е. источником  $P_{SC}$  в вечернем секторе являлось усиление (или модуляция) интенсивности восточной электроструи, скорее всего за счет вариаций интенсивности потока высыпающихся частиц и ионосферной проводимости. Пульсации  $P_{SC}$  регистрировались также на меридиане  $\sim 21$  MLT (DAW) (рис. 3), но на фоне усиления западной электроструи. Сравнение отфильтрованных  $P_{SC}$  с  $T \approx 5-10$  мин на станциях ТИХ и DAW показало, что коррелированные пики  $\Delta H$  в DAW запаздывали относительно ТИХ на  $\Delta t \sim 2-3$  мин. Пульсации  $P_{SC}$  регистрировались, по-видимому, также на спутнике GOES-10 (рис. 6).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, внезапное сжатие магнитосферы солнечным ветром привело к геомагнитному отклику на ночной стороне Земли, который проявился в усилении двухвихревой токовой системы типа DP2, подобно тому, что наблюдалось в первые пять минут после начала SC 29.IX.2003 г. [4]. В отличие от [4] в данном событии интенсивность электроструй была значительно (в 4–5 раз) меньше и в ночном секторе западная электроструя наблюдалась только до широт  $\sim 67^\circ$  (рис. 4), в то время как 29.X.2003 г. она достигла широт полярной шапки. Это отличие, возможно, связано с более меньшими скоростями солнечного ве-

тра и величиной  $P_d$  20.XI.2003 г. и отсутствием развития токового клина суббури в течение  $\sim 20$  мин после SC по сравнению с 29.X.2003 г. Особенностью развития магнитной бури 20.XI.2003 г. после начала SC является квазипериодическая пространственная модуляция яркости аврорального свечения, сопровождающаяся генерацией пульсаций  $P_{SC}$  с  $T \approx 5-10$  мин в вечерне-полуночном секторе (рис. 2–3). Пространственная модуляция яркости свечения представляла собой повторяющиеся интервалы кратковременного расширения сияний к полюсу в виде последовательного и быстрого образования дуг полярнее предыдущих авроральных структур - до пяти в течение  $\sim 1.5$  мин (рис. 2). После ухода сияний к полюсу на фазе их затухания, формировались  $N-S$  структуры в течение нескольких минут (рис. 2), подобно тому, что наблюдается в течение фазы экспансии суббури после начала пульсаций  $P_i2$  [7]. В целом, развитие сияний во время вспышек яркости свечения является типичным для периодов дискретного формирования авроральной выпуклости в некоторых суббурих [5], но в нашем случае, это происходило значительно быстрее. Время появления новой дуги составляло  $\sim 15-20$  с. По характеру расширения сияний к полюсу до  $2-3^\circ$ , длительности, повторяемости с  $T \approx 5-10$  мин, вариациями  $\Delta H \leq 250$  нТл такая активность сияний подобна микросуббуревой активности [8]. Однако в данном событии не наблюдалось четкой связи вспышек сияний с пульсациями  $P_i2$  (рис. 5), которые являются одним из признаков микросуббури [5], возможно потому, что станция MSR располагалась в вечернем секторе.



**Рис. 5.** Сверху вниз: диаграмма пространственно-временного распределения аврорального свечения, вариации  $H$ -компоненты на станциях TIX, CHD, ZYK, отфильтрованные записи в диапазоне пульсаций  $P_2$  на станции MSR и вариации  $B_y$ ,  $B_z$ ,  $P_d$  по данным спутника ACE, которые сдвинуты на  $\sim 36$  мин.

Квазипериодическая модуляция яркости свечения и возбуждение  $P_{SC}$  вероятнее всего была обусловлена многократными переворотами  $B_z$  ММП (рис. 5), что привело к вариациям уровня магнитосферной конвекции – последовательному ее усилению и ослаблению. Такие вариации уровня магнитосферной конвекции должны привести к модуляциям интенсивности DP2 токовой системы, что может явиться источником  $P_{SC}$ . С другой стороны, перевороты  $B_z$  ММП к северу могут стимулировать формирование токового клина суббури, т.е. ионосферного тока западного на-

правления [9]. Появление таких кратковременных токовых струй на фоне DP2 токовой системы могло быть другим источником  $P_{SC}$ . Однако, в этом случае, в вечернем секторе появление  $P_{SC}$  должно проявляться в ослаблении интенсивности восточной электроструи. На самом же деле, как отмечалось выше,  $P_{SC}$  в  $\sim 17$  MLT вызваны усилениями восточной электроструи и скорее всего их возбуждение – результат модуляции интенсивности DP2 токовой системы, за счет вариаций ионосферной проводимости и интенсивности продольных токов.

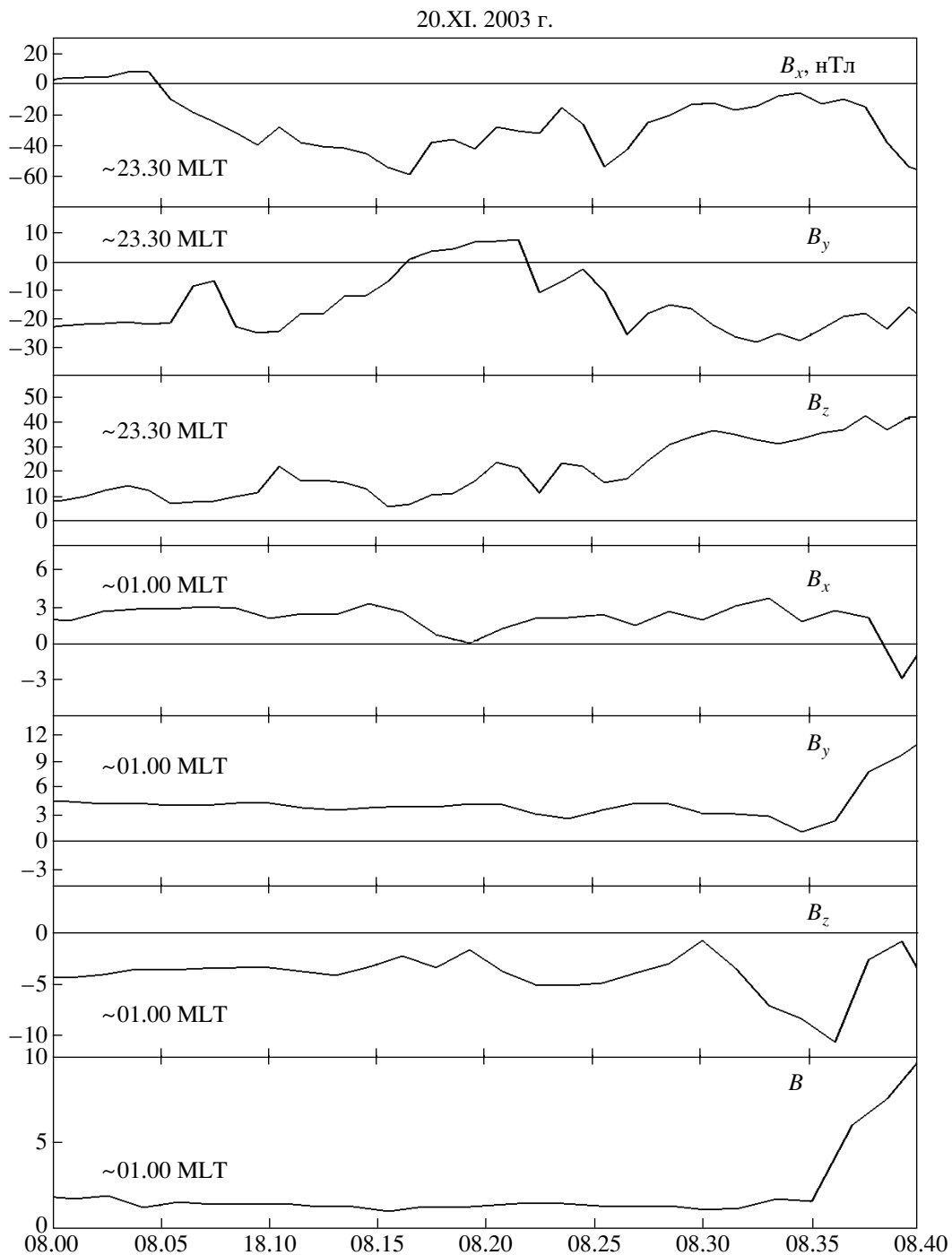


Рис. 6. Вариации  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ -компонент магнитного поля в магнитосфере по данным спутника GOES-10.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начало большой магнитной бури 20.XI.2003 г. с  $D_{st} \approx -472$  нТл привело к усилению DP токовой системы, уярчению дуги сияний, пространственной модуляции яркости аврорального свечения и генерации пульсаций  $P_{SC}$  с квазипериодами  $T \approx 5-10$  мин. Модуляция яркости сияний характеризовалась повторяющимися кратковременными рас-

ширениями сияний к полюсу от  $2^\circ$  до  $4^\circ$  со скоростью до  $\sim 3$  км/с. Расширение сияний происходило в виде быстрого образования новых дуг полнее предыдущих со скоростью  $\sim 5$  дуг в течение  $\sim 1.5$  мин. Характер расширения сияний, их длительность и повторяемость  $\sim 5-10$  мин подобна характеристикам микросуббулевой активности. В вечернем секторе периоды усиления яркости свече-

ния и расширения сияний к полюсу по времени соответствуют положительным импульсам  $\Delta H P_{SC}$ .

Из сравнения вариаций  $B_z$ -компоненты ММП с динамикой сияний и вариаций магнитного поля можно заключить, что пространственная модуляция яркости свечения и возбуждение  $P_s$  было вызвано повторяющимися переворотами  $B_z$  с юга на север и обратно, изменяющихся в некоторых интервалах от  $-15 \dots -20$  нТл до  $10-15$  нТл.

Предполагается, что резкий импульс динамического давления солнечного ветра приводит к усилению DP2 токовой системы, а не к типичной суббуре, а источником  $P_{SC}$  являлась модуляция DP2 иорносферных токов за счет вариаций ионосферной проводимости и интенсивности продольных токов.

Авторы благодарят за предоставленную возможность использования данных сети CANOPUS – Канадское космическое агенство, Greenland Coast chain – д-ра Ю. Ватермана, материалов спутниковых наблюдений по CDAWEB: GOES-10 – д-ра Х. Сингера, ACE – д-ра Д. Мак-Корнаса и д-ра Н. Несса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 03-05-39011-ГФЕН. Часть работ – в рамках гранта INTAS Ref. № 03-51-5359.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Huшида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980.
2. *Saito T., Matsushita S.* Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses // Planet. Space Sci. 1967. V. 15. P. 573.
3. *Kokubun S., McPherron R., Russell C.* Triggering of substorms by solar wind discontinuities // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 74–86.
4. *Соловьев С.И., Моисеев А.В., Муллаяров В.А., Ду А. и др.* Глобальный геомагнитный отклик на резкое сжатие магнитосферы и вариации ММП 29 октября 2003 г. // Космич. исслед. 2004.
5. *Сергеев В.А., Цыганенко Н.А.* Магнитосфера Земли. М.: Наука, 1980.
6. *Соловьев С.И., Моисеев А.В., Юмото К., Енgebретсон М.Л.,* Характеристики магнитосферно-ионосферных возмущений в периоды роста динамического давления солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия 2003. Т. 43. № 5. С. 620–634.
7. *Баишев Д.Г., Соловьев С.И., Баркова Е.С. и др.* Характеристики авроральных стримеров и их связь с суббурами и авроральными факелами // Солнечно-земная физика. Иркутск, 2002. Вып. 2.
8. *Sergeev V.A., Pulkkinen T.I., Pellinen R.J.* Coupled-mode scenario for the magnetospheric dynamics // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 13047.
9. *Lyons L.* A new theory for magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 19069–19081.