

УДК 550.385.37

## ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НАЧАЛЬНУЮ ФАЗУ РЕКУРРЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ (27 ФЕВРАЛЯ–2 МАРТА 2008 г.)

© 2011 г. Н. Г. Клейменова<sup>1, 4</sup>, О. В. Козырева<sup>1</sup>, Ю. Маннинен<sup>2</sup>,  
Т. Райта<sup>2</sup>, Т. А. Корнилова<sup>3</sup>, И. А. Корнилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Учреждение РАН Институт физики Земли, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

<sup>3</sup> Учреждение РАН Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

<sup>4</sup> Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва, Россия

e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 28.03.2011 г.

Выполнен анализ комплекса геофизических явлений (геомагнитные пульсации разных диапазонов частот, ОНЧ излучения, риометрическое поглощение и полярные сияния) в начальную фазу большой рекуррентной магнитной бури 27 февраля–2 марта 2008 г. в минимуме солнечной активности. Эта буря отличалась от типичных магнитных бурь тем, что ее начальная фаза развивалась на фоне длительного периода отрицательных значений  $B_z$  ММП, и наиболее интенсивные волновые возмущения в начальную фазу бури наблюдались не в дневном, как это происходит в большинстве случаев, а в вечернем и ночном секторах магнитосферы. Прохождение плотного транзиента (с  $N_p$  до  $30 \text{ см}^{-3}$ ) в солнечном ветре на фоне южного направления ММП на переднем фронте высокоскоростного потока, ответственного за обсуждаемую бурю, вызвало большую ( $AE$ -индекс  $\sim 1250$  нТл) магнитосферную суббурю. Обнаружено одновременное появление ОНЧ хоров, сопровождаемых всплесками риометрического поглощения и  $Pc5$  пульсациями, в очень большом долготном интервале авроральных широт ( $L \sim 5$ ) – от предполуночных до предполуденных часов MLT. Сделан вывод, что резкое возрастание динамического давления солнечного ветра на фоне длительных отрицательных значений  $B_z$  ММП привело к глобальному по долготе развитию электронно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере Земли.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что магнитные бури исследуются более 100 лет, многие важные проблемы физики их развития остаются неизученными. Нет единого мнения даже в таком относительно простом вопросе, какие фазы следует выделять в развитии магнитной бури. Согласно давно установившимся классическим представлениям [например, Акасофу и Чепмен, 1975], типичная магнитная буря состоит из трех фаз: начальной, главной и восстановительной. Начальная фаза характеризуется положительными значениями  $Dst$ -индекса, вызванными усилением динамического давления солнечного ветра и подходом к орбите Земли плотного транзиента на переднем фронте высокоскоростного потока солнечной плазмы. Столкновение магнитосферы с межпланетной ударной волной вызывает внезапное начало магнитной бури ( $SC$ ), наиболее четко регистрируемое в дневном секторе средних и низких широт. Сразу после  $SC$ , когда Земля находится в области сжатого турбулентного фронта межпланетного магнитного облака, в дневном секторе полярных широт обычно наблюдаются интенсив-

ные геомагнитные возмущения и геомагнитные пульсации диапазона  $Pc5$  ( $f \sim 2\text{--}7$  мГц) [например, Schott et al., 1998, Manninen et al., 2002, Козырева и др., 2004].

В то же время в ряде работ [например, Loewe and Ploss, 1997] начальная фаза магнитной бури вообще исключается из рассмотрения, особенно в случае рекуррентных магнитных бурь с постепенным началом, поскольку считается, что начальная фаза не влияет на дальнейшее развитие главной фазы бури. Однако физические процессы в магнитосфере Земли во время начальной и главной фаз бури принципиально различны и развиваются в различных магнитосферных доменах.

В большинстве случаев начальная фаза магнитной бури развивается при северном направлении ММП и сопровождается возрастанием динамического давления солнечного ветра. Как отмечалось еще в ранних работах [например, Акасофу и Чепмен, 1975], в начальную фазу бури наиболее интенсивные геомагнитные вариации и пульсации с периодами в несколько минут наблюдаются в дневном секторе полярных широт, что обычно связано с прямым проникновением гидромаг-

нитных волн из солнечного ветра. В главной фазе магнитной бури, развивающейся после поворота ММП к югу и уменьшения динамического давления солнечного ветра, основные геомагнитные возмущения, как правило, наблюдаются в вечернем и ночном секторах авроральных широтах. Даже, исходя из этих различий, выделение начальной фазы магнитной бури в отдельный этап развития бури является целесообразным. Длительность начальной фазы бури в разных бурях разная и изменяется от нескольких мин до 8–24 ч в зависимости от характеристик солнечного ветра и размеров области плотной плазмы на переднем фронте высокоскоростного потока (в случае так называемых *CIR*-бурь) или магнитного облака (*CME*-бури).

Цель данной работы – исследовать комплекс явлений, таких как геомагнитные пульсации разных диапазонов частот, риометрическое поглощение, ОНЧ излучения, полярные сияния, в начальную фазу небольшой рекуррентной магнитной бури 27 февраля–2 марта 2008 г. в минимуме солнечной активности. Эта буря отличалась от типичных магнитных бурь тем, что ее начальная фаза развивалась на фоне длительного периода отрицательных значений  $B_z$  ММП, и наиболее интенсивные волновые возмущения в начальную фазу бури наблюдались не в дневном, а в вечернем и ночном секторах магнитосферы.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хорошо известно, что минимум солнечной активности характеризуется умеренными и слабыми (небольшие величины *Dst*-индекса) рекуррентными магнитными бурями, вызванными высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр (*CIR*-бури). В 2008 г. наблюдалась длинная 27-дневная последовательность из 14-ти магнитных бурь, рассматриваемая буря – третья из них.

**2.1.** Рассмотрим высокоширотные геомагнитные волновые возмущения в начальную фазу обсуждаемой бури – 27 февраля–02 марта 2008 г. Эта буря была следствием прохождения Землей высокоскоростного потока солнечного ветра от большой рекуррентной корональной дыры, наблюдающейся 25 февраля в западной полусфере видимого диска Солнца. Особенностью этой магнитной бури была относительно большая длительность начальной фазы, наблюдаемой на фоне небольших отрицательных значений  $B_z$  ММП, что способствовало развитию интенсивной суббури в ночной магнитосфере.

Часовые вариации параметров межпланетного магнитного поля ( $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  ММП) и солнечного ветра (скорость –  $V$ , плотность –  $N_p$  и динамическое давление –  $P$ ) показаны на рис. 1а (данные

OMNI, [http://nssdcnp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\\_data/omni/](http://nssdcnp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/)) за период с 24 февраля до 5 марта. На рисунке также приведены вариации *Dst*- и *AE*-индексов. Видно, что данной буре предшествовал достаточно длительный магнитоспокойный период при отрицательных значениях  $B_z$  ММП. Начало бури связано с резким всплеском в плотности солнечного ветра 27 февраля.

Более детально 1-мин вариации параметров ММП и солнечного ветра в начальную фазу магнитной бури 27 февраля показаны на рис. 1б, где видно, что начальная фаза бури характеризовалась большим всплеском динамического давления (до 8 нПа) и скачкообразными возрастаниями скорости солнечного ветра. Скачок динамического давления солнечного ветра около 15 UT вызвал импульс  $S_i$  ( $SC?$ ), наблюдающийся на земной поверхности в виде положительного импульса в замкнутой магнитосфере и отрицательного – в полярных широтах.

**2.2.** В 16.30–17.30 UT в солнечном ветре вблизи орбиты Земли был зарегистрирован плотный транзиент с  $N_p$  до  $30 \text{ см}^{-3}$  (рис. 1б), а в ~18.45 UT в магнитосфере началась суббуря с максимальным значением *AE*-индекса ~1250 нТл (рис. 1а). В ночном секторе магнитосферы на скандинавском профиле станций IMAGE суббуря наблюдалась одновременно в большом интервале геомагнитных широт ( $\Phi \sim 56\text{--}76^\circ$ ). Эти данные показаны на рис. 2а. Сопоставляя вариации  $X$  и  $Z$  компонент поля, можно заключить, что взрывное начало суббури произошло около 18.45 UT между обс. BJN и SOR, ближе к обс. SOR. Затем возмущение очень быстро стало распространяться к северу, что можно интерпретировать как быстрое перемещение возмущения от источника взрыва в хвост магнитосферы.

Перемещение магнитной активности к полюсу сопровождалось возбуждением в полярных широтах (BJN-LYR) геомагнитных пульсаций в полосе 2–7 мГц (диапазон  $Pc5\text{--}Pi3$ ), что показано на рис. 2б. Заметим, что, ранее было установлено [например, Manninen et al., 2002; Козырева и др., 2004; Козырева и Клейменова, 2010], что в начальную фазу магнитных бурь наибольшая волновая активность наблюдается в **дневном секторе** полярных широт и является результатом проникновения волновой турбулентности из солнечного ветра. В противоположность этому в обсуждаемый интервал времени начальной фазы бури (19–20 UT) наибольшая волновая активность в диапазоне 2–7 мГц наблюдалась в **ночном секторе**. Для подтверждения этого на рис. 2в показана карта глобального пространственного распределения амплитуд геомагнитных пульсаций в 19.00–19.45 UT, построенная в координатах: геомагнитная широта – местное геомагнитное время. Видно, что наиболее интенсивные пульсации наблю-

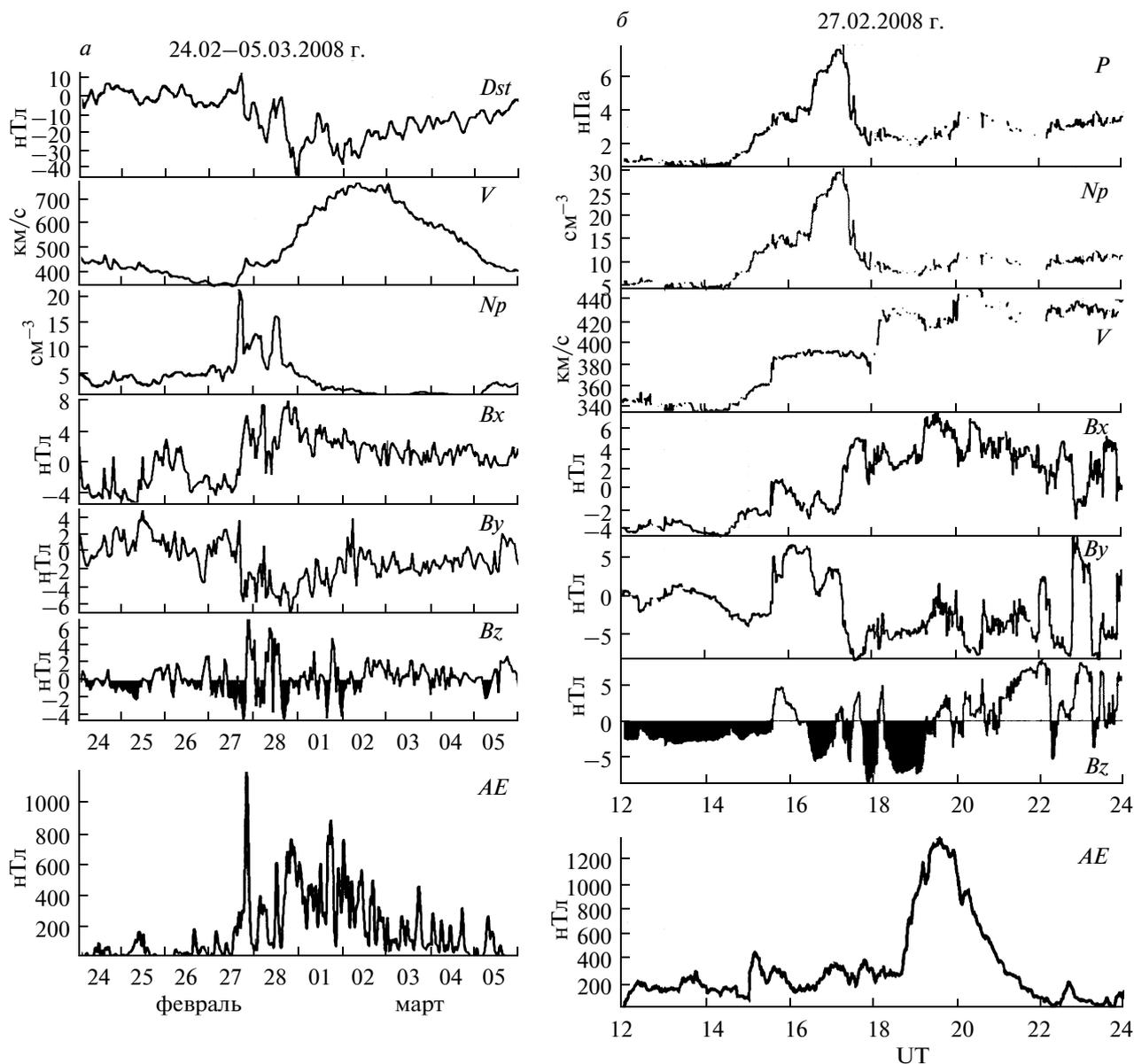


Рис. 1. Вариации  $Dst$ - и  $AE$ -индексов, а также параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра в период с 24 февраля по 5 марта 2008 г. (а); (б) – данные ММП и солнечного ветра в начальную фазу бури 27 февраля интервале 12–24 UT.

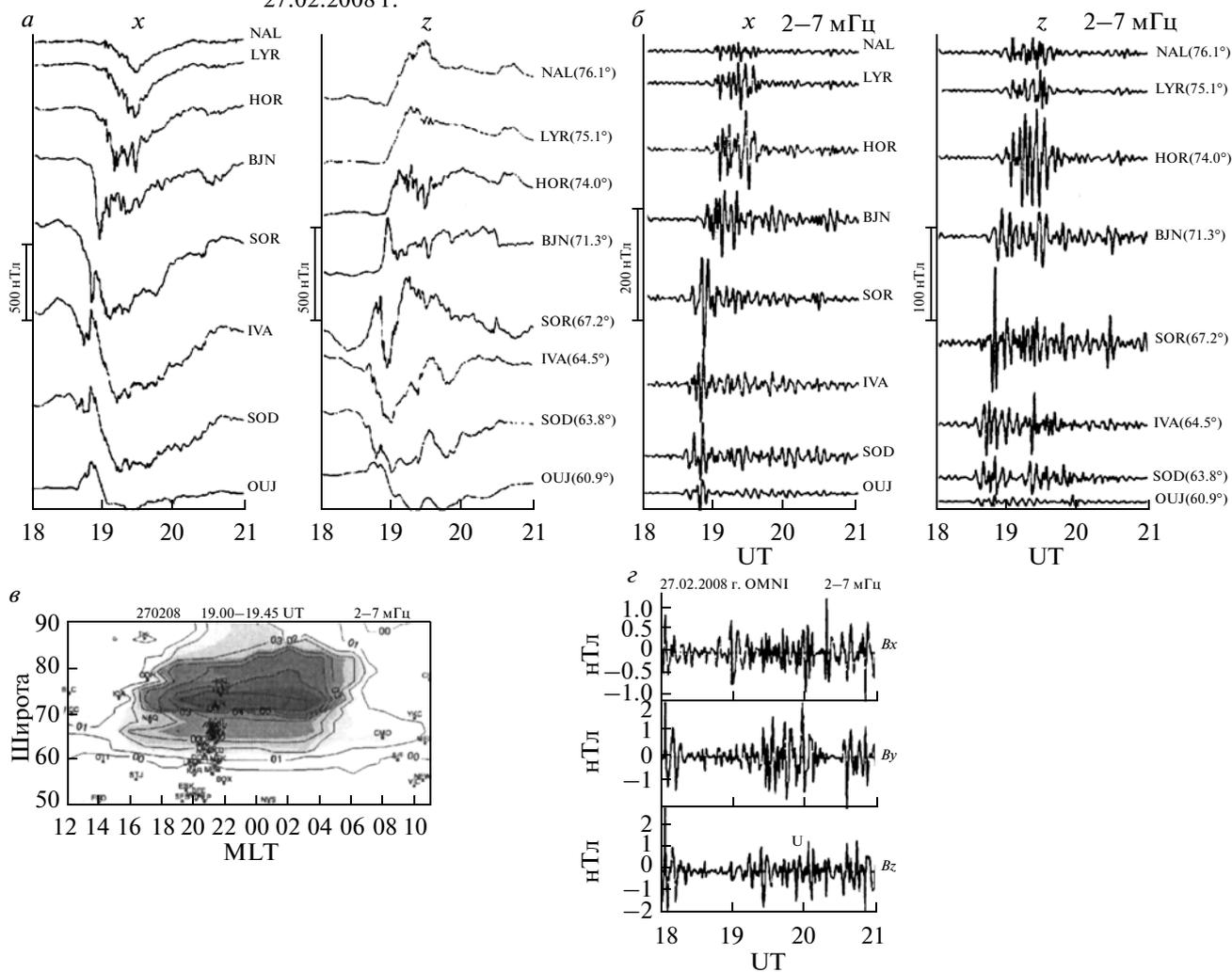
дались на геомагнитных широтах выше  $70^\circ$  в ночном секторе магнитосферы ( $\sim 19$ – $04$  MLT).

Сопоставление данных наземных наблюдений с вариациями межпланетного магнитного поля (рис. 2а), показало, что в ММП интенсивные пульсации отмечались в  $B_y$  и  $B_z$  компонентах, после 19.30 UT, в то время как на земной поверхности (рис. 2б) до  $\sim 19.30$  UT. Следовательно, можно предположить, что источник обсуждаемых колебаний, регистрируемых на земной поверхности до 19.30 UT, находился не в ММП, а, вероятно, в удаленном хвосте магнитосферы.

По модели Цыганенко T89 [http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/cgm/t89.html] было вычисле-

но положение проекции обсерваторий SOD, SOR, BJN в 19 UT. Вычисления показали, что обс. SOD проецируется вечернюю магнитосферу в точку с координатами  $X = -6.1$  Re,  $Y = +5.6$  Re; обс. SOR – в точку с  $X = -15.2$  Re,  $Y = +12.0$ ; а обс. BJN – глубоко в хвост магнитосферы в точку с  $X = -42.8$ ,  $Y = +19.5$ . Чтобы понять, что происходило в хвосте в обсуждаемый интервал времени, было полезно рассмотреть данные регистрации на спутниках проекта THEMIS. К сожалению, в 18–21 UT спутники THEMIS TH-D и TH-E находились слишком близко к Земле, а спутники TH-C и TH-B были в долях хвоста на большом азимутальном расстоянии (более 10 Re). Спутник TH-A был в

27.02.2008 г.



**Рис. 2.** Магнитограммы некоторых станций профиля IMAGE во время суббури (а), геомагнитные пульсации в полосе 2–7 мГц (б), карта глобального пространственного распределения амплитуд этих пульсаций в 19.00–19.45 .UT в координатах геомагнитная широта – местное геомагнитное время (в), и отфильтрованные в полосе 2–7 мГц данные ММП (г), приведенные к границе магнитосферы.

вечернем секторе внутри магнитосферы в области с координатами:  $X = -(4-9) Re$ ,  $Y = +(4-5) Re$ ,  $Z = -(1-0) Re$ , т.е. находился близко к проекции обс. SOD. В 19 UT спутник ТН-А был на расстоянии  $X = -5.3 Re$ , а в 20 UT – на  $X = -6.4 Re$ . На рис. 3 приведены вариации магнитного поля на спутнике ТН-А в 18–20 UT. Интенсивные всплески пульсаций в  $B_x$  и  $B_y$  компонентах поля на этом спутнике наблюдалось в 18.50 UT, т.е. после взрывного начала суббури. Такая задержка не удивительна, поскольку в это время спутник располагался глубже в магнитосфере, чем проекция обс. SOD и область взрыва в хвосте. Судя по наземным данным, источник суббури находился, предположительно, на расстоянии порядка 20 Re (рис. 2а). Наблюдаемые на Земле в полярных широтах интенсивные геомагнитные пульсации в ~19.00–19.30 UT (рис. 2б) на спутнике ТН-А не

отмечались, по-видимому, потому, что спутник находился ближе к Земле, чем источник этих колебаний.

В дневном секторе магнитосферы на геостационарном спутнике GOES-11 в обсуждаемый интервал времени большой всплеск геомагнитных пульсаций диапазона  $Pc5$  был зарегистрирован во всех компонентах поля в 19.50–20.20 UT (рис. 4а). Заметим, что вблизи экваториальной плоскости на геостационарных спутниках компонента  $H_r$  соответствует направлению вдоль силовых линий,  $H_e$  – радиальному, и  $H_n$  – азимутальному. Следовательно, колебания в магнитосфере имели как тороидальную, так и полоидальную составляющую поля. Одновременно подобные всплески  $Pc5$  пульсаций наблюдались на земной поверхности как в предполуденном секторе в обс. УКС ( $\Phi = 69.0^\circ$ ,  $\Lambda = 293.3^\circ$ ), находящейся вблизи про-

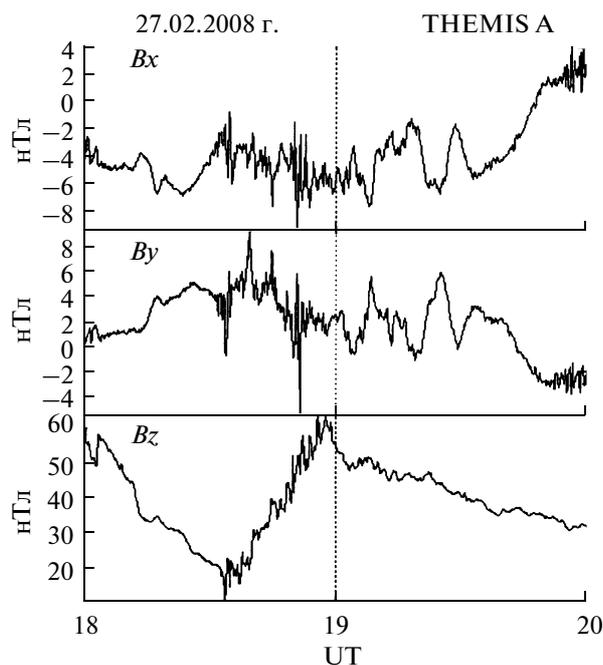


Рис. 3. Вариации магнитного поля на спутнике THEMIS TH-A, находящегося в вечерней магнитосфере в точке с координатами:  $X = -(4-9) R_e$ ,  $Y = +(4-5) R_e$ ,  $Z = -(1-0) R_e$ .

екции спутника GOES-11 на земную поверхность, так и в околополночное время в обл. SOD (рис. 4б). Следовательно, эти колебания носили глобальный характер, в дневном секторе их амплитуда была почти в 3 раза больше, чем в ночном секторе. Глобальность колебаний четко видна на карте планетарного распределения амплитуд пульсаций в 19.45–20.30 UT, приведенной на рис. 4з. Ранее глобальные дневные  $Pc5$  пульсации в начальную фазу магнитной бури отмечались лишь в отдельных больших магнитных бурях, например, 24 марта 1991 г. [Fujitani et al., 1993; Schott et al., 1998].

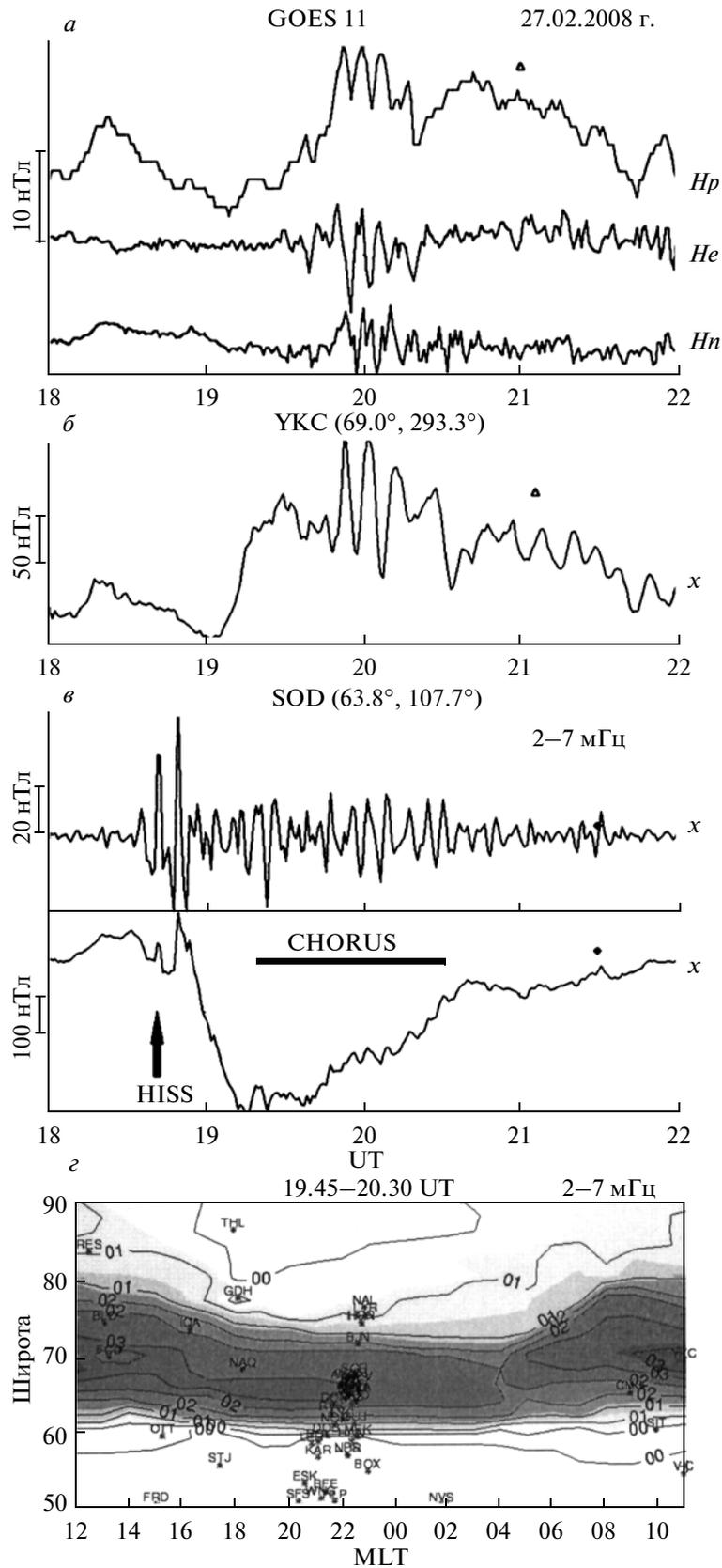
2.3. Во время этой бури финскими специалистами проводился сеанс регистрации наземных ОНЧ излучений в выносной точке около обл. Соданкюля – Kannuslehto (KAN), географические координаты которой  $\varphi = 67.74^\circ N$ ,  $\lambda = 26.27^\circ E$ , а исправленные геомагнитные –  $\Phi = 64.2^\circ$ ;  $\Lambda = 107.9^\circ$ ,  $L = 5.3$ . Анализ данных ОНЧ наблюдений показал, что в момент начала суббури (~18.45 UT) наблюдался короткий всплеск авроральных ОНЧ шипений (auroral hiss), сопровождаемый импульсными всплесками геомагнитных пульсаций типа  $Pi1B$  (рис. 5). Камера полного неба (ASC) в обл. SOD зарегистрировала в это время развитие брейкапа полярных сияний (верхняя часть рис. 5а). Анализ поляризации ОНЧ волн показал, что для ОНЧ шипений была характерна правая поляризация. Согласно теоретическим представлениям

[например, Yearby and Smith, 1994], это является результатом того, что точка выхода ОНЧ волн из ионосферы находится недалеко от наземного пункта регистрации и в данном случае, по-видимому, совпадает с областью развития аврорального брейкапа. Генерация всплесков геомагнитных пульсаций  $Pi1B$  обычно связывается с высыпанием в ионосферу авроральных электронов во время взрывной фазы суббури [Troitskaya and Kleimeno-va, 1972] при усилении продольных электрических токов, направленных из ионосферы.

Примерно через 50 мин после всплеска авроральных шипений на земной поверхности был зарегистрирован всплеск ОНЧ хоров (средняя часть рис. 5б). Анализ поляризации этих волн показал, что для хоров отмечается как правая, так и левая поляризация, что может быть результатом одновременного прихода сигналов с разных расстояний. Наиболее интенсивные хоры наблюдались в интервале 19.35–20.00 UT в полосе ~0.5–1.5 кГц. В 20.00 UT спектр хоров резко изменился и сместился в сторону более высоких частот, что может быть результатом перемещения источника хоров на более низкие  $L$ -оболочки. Заметим, что именно около 20 UT вблизи границы магнитосферы по данным OMNI был зарегистрирован небольшой скачок в скорости и плотности солнечного ветра (рис. 1б), т.е. в динамическом давлении, что может вызвать такое перемещение.

Кроме того, в 20 UT в обл. SOD было отмечено начало геомагнитных пульсаций  $Pc1$  в полосе 0.6–1.5 Гц с расширяющимся динамическим спектром (нижняя часть рис. 5в), что свидетельствует о развитии в магнитосфере Земли нелинейной стадии ионно-циклотронной неустойчивости энергичных протонов [Фейгин и др., 2009]. Хорошо известно, что генерация  $Pc1$  может происходить в магнитосфере в области вечернего выступа плазмопаузы или в области оторвавшихся от нее облаков холодной плазмы. Однако обсуждаемый интервал времени соответствует ночным, а не вечерним часам местного времени. В работе [Spasojevic et al., 2003] показано, что и в ночное время при отрицательных значениях  $Bz$  ММП в пространственной структуре плазмопаузы на  $L \sim 4.5-5.5$  возможны вариации плотности за счет коротации плазменных выступов (“plume”) вместе с плазмосферой. Возможно, что в нашем случае наблюдалась именно такая ситуация.

Хоровые излучения типичны для утреннего сектора магнитосферы, и давно известно [например, Клейменова и др., 1970; Smith et al., 1996], что они тесно связаны с суббуриями, развивающимися в ночной магнитосфере. Однако в обсуждаемом случае всплеск интенсивных хоров наблюдался в околополночное время, что является нетипичным для “классических” хоров. Мы предположили, что в данном случае генерация хоров происхо-



**Рис. 4.** Геомагнитные пульсации  $Pc5$  на геостационарном спутнике GOES-11 (а) и на наземной обс. YKC (б), находящейся вблизи проекции этого спутника на земную поверхность; треугольник – местный геомагнитный полдень; внизу магнитограмма и  $Pc5$  геомагнитные пульсации в обс. SOD (в), зачерненный ромб – местная геомагнитная полночь и карта глобального распределения  $Pc5$  в 19.45–20.30 UT (г).

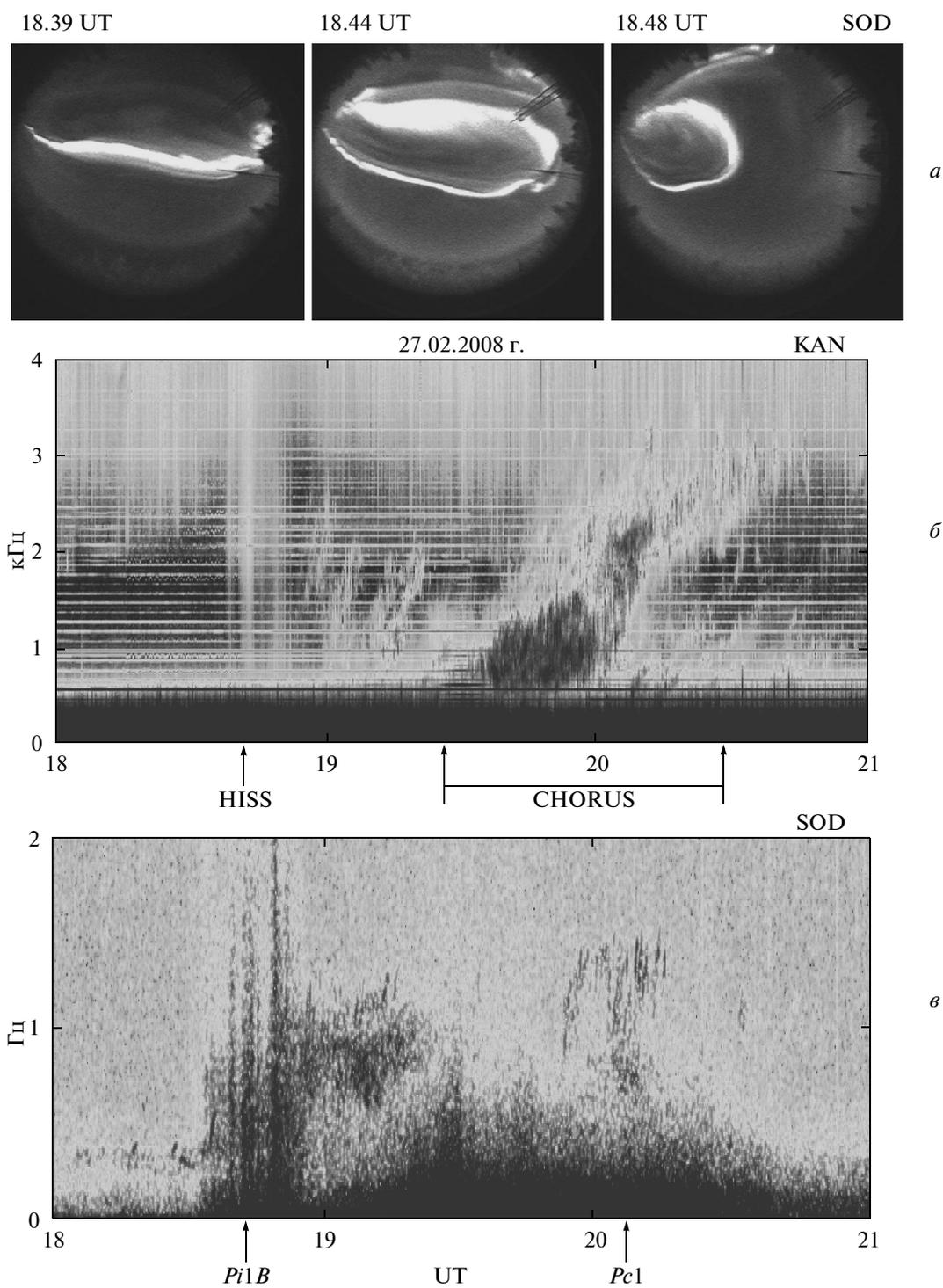


Рис. 5. Кадры полярных сияний в обс. SOD (а), сонограммы ОНЧ излучений (б) и геомагнитных пульсаций  $Pi1B$  и  $Pc1$  (в).

дила одновременно в большом долготном интервале. Подтверждением такого предположения является факт одновременного появления хоров на Якутском меридиане (частное сообщение В.А. Муллаярова), т.е. в утреннем секторе ( $\sim 04$  MLT).

Во многих работах [например, Vortnik and Thorne, 2007] показано, что генерация хоров в магнитосфере приводит к питч-угловому рассеиванию энергичных частиц и их высыпанию, что на земной поверхности отмечается как возрастание

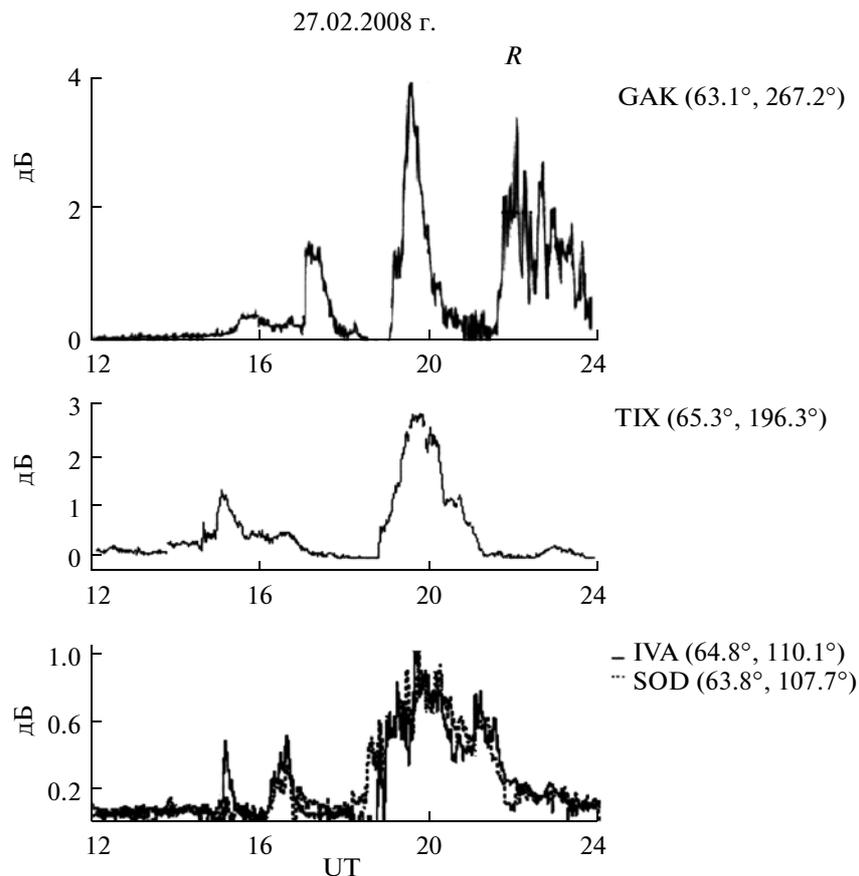


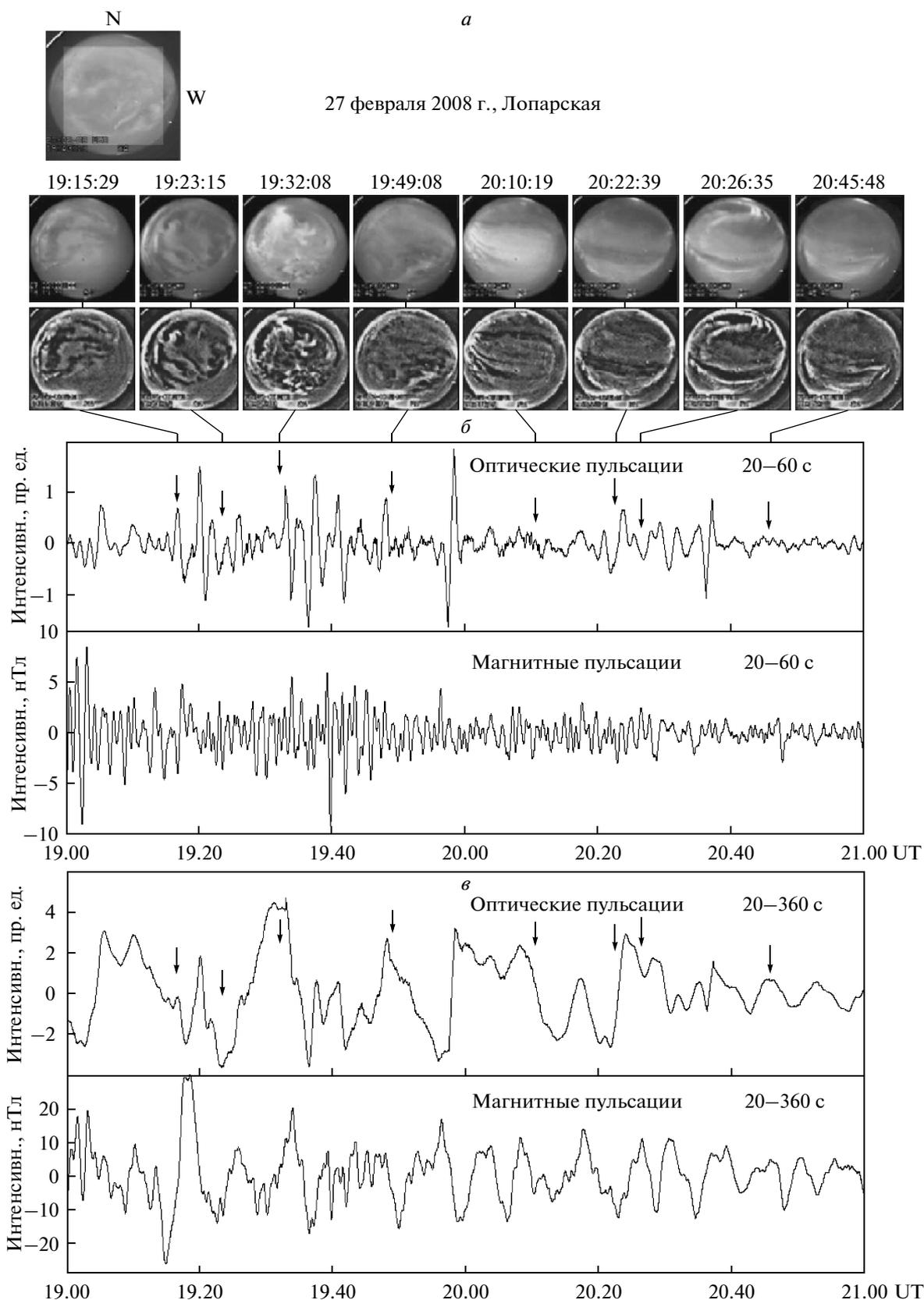
Рис. 6. Данные риометрических наблюдений на разнесенных по долготе станциях.

риометрического поглощения. На рис. 6 приведены данные риометрических наблюдений на 3-х разнесенных по долготе станциях, расположенных в авроральных широтах ( $L \sim 5$ ): Соданкюля (SOD,  $\Phi = 63.80^\circ$ ,  $\Lambda = 107.7^\circ$ ), Тикси (TIX,  $\Phi = 65.3^\circ$ ,  $\Lambda = 196.3^\circ$ ) и Гакона (GAK,  $\Phi = 63.1^\circ$ ,  $\Lambda = 267.2^\circ$ ). Данные obs. Тикси были нам любезно предоставлены С.Н. Самсоновым. Эти станции в момент генерации обсуждаемого всплеска хорв ( $\sim 20$  UT) находились, соответственно, в ночном (SOD,  $\sim 23$  MLT), раннем утреннем (TIX,  $\sim 04$  MLT) и предполуденном (GAK,  $\sim 10$  MLT) секторах магнитосферы. Видно хорошее подобие временных вариаций риометрического поглощения на всех станциях, особенно четкое около 20 UT. Исходя из этого, мы можем предположить, что в 19.30–20.30 UT в магнитосфере одновременная генерация ОНЧ хорв происходила в очень большом долготном интервале авроральных широт — от предполуденных до предполуденных часов местного геомагнитного времени. Отметим, что именно в этот интервал времени наблюдалась генерация *Pc5* пульсаций в глобальном масштабе.

2.4. Результаты оптических (ASC) наблюдений в северной Скандинавии показали, что в началь-

ную фазу обсуждаемой бури интенсивные полярные сияния наблюдались с 18.40 до 21.00 UT. После наблюдаемого в obs. SOD брейкапа в 18.44 UT (средний кадр в верхнем ряду на рис. 5) сияния начали быстро перемещаться к северу, и около 19 UT согласно кеограммам (эти данные здесь не приводятся) интенсивные сияния начались в полярной obs. NAL ( $\Phi = 76.1^\circ$ ). Интенсивные сияния наблюдались в obs. NAL до  $\sim 19.30$  UT, т.е. в тот же интервал времени, когда в полярных широтах (obs. HOR — NAL) регистрировались интенсивные геомагнитные пульсации в полосе 2–7 мГц (рис. 2б).

Телевизионные наблюдения полярных сияний в это время проводились и в obs. Лопарская (LOR,  $\Phi = 64.94^\circ$ ,  $\Lambda = 113.6^\circ$ ). Анализ этих наблюдений с использованием специальной программы фильтрации данных, разработанной И.А. Корниловым [Корнилов и др., 2008], позволил исследовать тонкие временные особенности сияний. На рис. 7а приведено несколько характерных телевизионных кадров, демонстрирующих меняющиеся со временем режимы оптических пульсаций. В верхнем ряду показаны исходные телевизионные (нефильтрованные) кадры камеры полного неба, под



**Рис. 7.** Телевизионные кадры полярных сияний, демонстрирующие разные режимы оптических пульсаций по наблюдениям в обс. Лопарская (а), верхний ряд — исходные кадры регистрации, нижний ряд — эти же данные, отфильтрованные по методике [Корнилов и др., 2008]. Оптические и магнитные пульсации для диапазонов периодов: 20–60 с (б) и 20–360 с (в).

ними приведены результаты фильтрации этих кадров. Четко видно, что только после фильтрации стало возможным увидеть изменение режимов пульсирующих сияний, развивающихся на фоне диффузного свечения.

На рис. 7а видно, что в 19:15:29–19:23:15 UT крупномасштабные пульсирующие пятна заполняли все поле зрения ТВ камеры, и смешались на юг. Постепенно изменялись формы и уменьшались размеры пульсирующих структур (19:32:08 UT) с последующей перестройкой пульсирующих пятен в пульсирующие дуги, ориентированные в восточно-западном направлении и дрейфующие на юг (кадр 20:10:19). В это время в ОНЧ хорах в обс. SOD (рис. 5б) наблюдалось постепенное возрастание частотной полосы излучений до ~2.2 кГц, а в магнитном поле регистрировались *Pc5* пульсации в глобальном масштабе.

В 20:22:08 UT началась новая активизация сияний на севере видимости ТВ камеры. Это соответствует появлению импульсного всплеска (2–7) мГц геомагнитных пульсаций в обс. SOR ( $\Phi = 67.2^\circ$ ). Затем пульсирующие дуги сияний сместились на юг (кадры 20:26:35–20:45:48 UT). Такое изменение режима пульсирующих сияний, как и появление ОНЧ хоры, более характерно для утренних часов, чем для вечерних.

Динамику периодов оптических пульсаций можно проследить по результатам фотометрирования с последующей цифровой фильтрацией. Было выбрано два диапазона периодов: 20–60 с (рис. 7б) и 20–360 с (рис. 7в), Вертикальными стрелками отмечены моменты времени, соответствующие телевизионным кадрам на рис. 7а, Область фотометрирования обозначена светлым квадратом внутри поля зрения телевизионного кадра в верхнем левом углу рис. 7. Под каждым графиком для оптических пульсаций приведены магнитные пульсации, регистрируемые в обс. Ловозеро (LOZ,  $\Phi = 64.22^\circ$ ,  $\Lambda = 114.6^\circ$ ) в том же диапазоне периодов.

Наиболее интенсивные оптические пульсации в диапазоне периодов 20–60 с наблюдались в ~19.20–20.30 UT (рис. 7б), т.е. в то время, когда в обс. Соданкюля регистрировался всплеск ОНЧ хоры (рис. 5). В магнитном поле в это время отмечались более высокочастотные колебания. Спектрограммы геомагнитных пульсаций, полученные с помощью индукционного магнитометра в обс. SOD (рис. 5в), подтвердили, что ОНЧ хоры, как это обычно и наблюдается, сопровождалась шумовыми геомагнитными пульсациями типа *Pi1C*, наиболее интенсивными в ~19.20–20.30 UT. Усиление геомагнитных пульсаций в этот временной интервал видно и на рис. 7б.

Такая же ситуация отмечалась и в более низком частотном диапазоне (рис. 7в). В оптических пульсациях наблюдались иррегулярные вариации

с периодом порядка 10 мин, а в магнитных – с периодом порядка 5 мин, Таким образом, наблюдения показали отсутствие подобия в вариациях оптических и магнитных пульсаций как в диапазоне периодов 20–60 с (рис. 7б), так и в более длинном периодном диапазоне 20–360 с (рис. 7в).

Однако заметим, что хорошей корреляции между этими явлениями ожидать трудно, так как оптические пульсации – явление локальное, пульсирующие сияния вызываются пульсирующими потоками высыпавшихся электронов с энергией 10–50 кэВ, а в магнитные пульсации решающий вклад вносят ионосферные токи, пространственно-временные характеристики которых могут существенно отличаться от параметров, характеризующих потоки высыпавшихся электронов.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ волновых геомагнитных возмущений в начальную фазу слабой рекуррентной магнитной бури (27 февраля–2 марта 2008 г.) показал, что в отличие от типичных магнитных бурь, наиболее интенсивные волновые возмущения в начальную фазу бури наблюдались не в дневном, как это происходит в большинстве случаев, а в вечернем и ночном секторах магнитосферы. Анализ наблюдений на разнесенных по долготе станциях показал, что *Pc5* пульсации, всплески высыпавшихся энергичных электронов (риометрическое поглощение) и ОНЧ хоры регистрировались одновременно в большом секторе долгот – от предполуденных до предполуденных.

Такая ситуация, по-видимому, возникла в результате того, что в начальную фазу бури и до нее наблюдались отрицательные значения *Bz* ММП, а на фоне которых плотный транзит с *Np* до ~30 см<sup>-3</sup> на переднем фронте высокоскоростного потока солнечного ветра привел к развитию сильной магнитосферной суббури с *AE* около 1250 нТл.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-00247 и 09-05-0018. Исследования Н.Г.К. и О.В.К. были также частично поддержаны обсерваторией Соданкюля (Финляндия), а работа Т.А.К. и И.А.К. – Программой ОФН “Плазменные процессы в Солнечной системе” № VI.15, норвежским грантом Norwegian Science Council grant 178911\S30 NORUSKA и шведским грантом DKK 230 00 from the Nordic Council of Ministers.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1975.
- Клейменова Н.Г., Распопов О.М., Нгуен Ким Тхоа. Долготный дрейф хоры и их связь с магнитными возмущениями на ночной стороне Земли // Гео-

- магнетизм и аэрономия. Т. 10. № 5. С. 854–859. 1970.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г., Шотт Ж.Ж. Геомагнитные пульсации начальной фазы магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 1. С. 37–46. 2004.
  - Козырева О.В., Клейменова Н.Г. Вариации ULF-индекса дневных геомагнитных пульсаций во время рекуррентных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 6. С. 799–809. 2010.
  - Корнилов И.А., Антонова Е.Е., Корнилова Т.А., Корнилов О.И. Тонкая структура сияний во время аврорального брейккапа по данным наземных и спутниковых наблюдений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 1. С. 9–22. 2008.
  - Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Хабазин Ю.Г., Прикнер К. Нелинейный характер ионно-циклотронных волн ( $Pc1$  пульсации) с расширяющимся динамическим спектром // Геомагнетизм и аэрономия Т. 49. № 3. С. 335–345. 2009.
  - Bortnik J., Thorne R.M. The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 69. P. 377–386. 2007.
  - Fujitani S., Araki T., Yumoto K. et al.  $Pc5$  pulsations appeared on March 24, 1991 // STEP GBRSC News. V. 3. № 1. P. 15–16. 1993.
  - Loewe C.A., Pross G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997.
  - Manninen J., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Ranta A. Long period geomagnetic and riometer pulsations response to the front edge of the magnetic cloud on January 10, 1997 // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 64 (17). P. 23–32. 2002.
  - Manninen J., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Turunen T.  $Pc5$  geomagnetic pulsations, pulsating particle precipitation, and VLF chorus: Case study on 24 November 2006 // J. Geophys. Res. V. 115. A00F14, doi:10.1029/2009JA014837, 2010.
  - Schott J.-J., Kleimenova N.G., Bitterly J., Kozyreva O.V. The strong  $Pc5$  magnetic pulsations in the initial phase of the great magnetic storm of March 24, 1991 // Earth Planets Space. V. 50. P. 101–106. 1998.
  - Smith A.J., Freeman M.P., Reeves G.D. Postmidnight VLF chorus events, a substorm signature observed at the ground near L-4 // J. Geophys. Res. V. 101. No A11. P. 24641–24653. 1996.
  - Spasojevic' M., Goldstein J., Carpenter D.L., Inan U.S., Sandel B.R., Moldwin M.B., Reinisch B.W. Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance, J. Geophys. Res. 108, A9,1340, doi: 10.1029/2003JA009987, 2003.
  - Troitskaya V.A., Kleimenova N.G. Micropulsations and VLF-emissions during substorms // Planet. Space Sci., 20, 9, 1499–1519, 1972.
  - Yearby K.H., Smith A.J. The polarization of whistlers received on the ground near  $L = 4$  // J. Atmos. Terr Phys. V. 56. P. 1499–1512. 1994.