

УДК 550.385.37

## ИЗОЛИРОВАННЫЕ НОЧНЫЕ СУББУРИ И УТРЕННИЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc5$ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ (THEMIS) НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. К. Кауристи<sup>1</sup>, М. В. Успенский<sup>1</sup>, Н. Г. Клейменова<sup>2</sup>, О. В. Козырева<sup>2</sup>, С. В. Дубягин<sup>1</sup>, А. А. Власов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Финский Метеорологический институт, г. Хельсинки, Финляндия

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Институт Метеорологических и климатических исследований, г. Карлсруе, Германия

e-mail: mikhail.uspensky@fmi.fi; kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 17.02.2013 г.

Приводятся результаты анализа комплекса явлений, развивавшихся в вечернем и утреннем секторах магнитосферы и ионосферы в двух событиях (18 января и 19 февраля 2008 г.). Используются данные наблюдений в хвосте магнитосферы на спутниках THEMIS и наземных наблюдений в утреннем (комплекс инструментов MIRACLE) и ночном (сеть наземных инструментов проекта THEMIS) секторах. Событиям с умеренными суббури ночного сектора, в утреннем секторе предшествовали интенсивные геомагнитные пульсации  $Pc5$ , режим которых менялся в ходе развития авроральных возмущений. Суббури сопровождалась диполизациями в хвосте магнитосферы на расстояниях  $\sim 10 R_e$  и внезапными скачкообразными потоками  $\sim 200$ -кэВ электронов. Потоки появлялись через несколько минут после брейкапа одновременно на трех центральных спутниках THEMIS, разнесенных между собой до  $\sim 1.7 R_e$ . По данным ASC камеры в NAL (три кадра/мин) и сети ASC камер THEMIS начало авроральных активизаций в ночном и утреннем секторах происходило одновременно. Обсуждаются возможные причины внезапного затухания или усиления  $Pc5$  пульсаций.

DOI: 10.7868/S001679401305009X

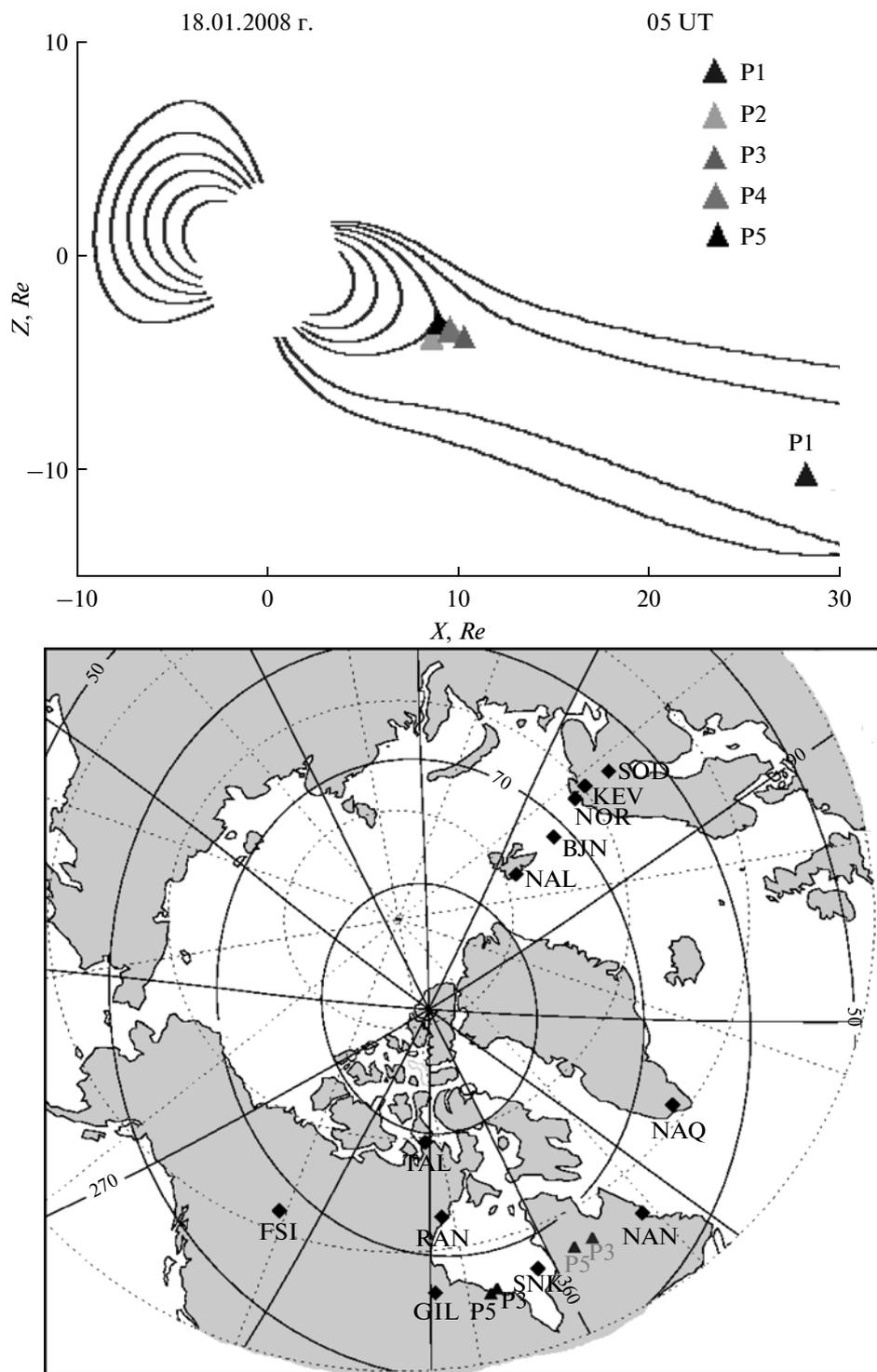
### 1. ВВЕДЕНИЕ

К малоизученным проблемам геофизики относится связь электродинамических процессов, развивающихся одновременно на ночной и утренней сторонах ионосферы и магнитосферы. Разработка этой темы требует согласованный анализ спутниковых наблюдений в хвосте магнитосферы и наземных наблюдений на разных долготах.

Известно, что типичным для утреннего сектора авроральных широт является высокая вероятность возникновения геомагнитных пульсаций  $Pc5$  ( $f = 1.6\text{--}6.6$  мГц). Имеется значительное число работ, посвященных исследованию таких пульсаций с использованием наземных магнитометров, например, [Mathie et al., 1999, Baker et al., 2003 и др.], радаров [Walker et al., 1979, Ruohoniemi et al., 1991] и спутников [Mitchel et al., 1990 и другие]. Генерация  $Pc5$  пульсаций связывается с возбуждением в магнитосфере Земли резонансных колебаний силовых линий геомагнитного поля, например, [Samson et al., 1992; Ziesolleck and McDiarmid, 1995]. В работах [Афанасьева и др., 1977; Samson and Rostoker, 1981; Rostoker et al., 1984;

Kleimenova et al., 2005] была показано, что интенсификация утренних  $Pc5$  пульсаций следует за началом суббури на ночной стороне. Ниже показано, что в ходе развития суббури может наблюдаться не только интенсификация пульсаций, но и их подавление.

Данная работа посвящена анализу двух событий, развивавшихся в вечернем и утреннем секторах магнитосферы и ионосферы 18 января и 19 февраля 2008 г. Анализ базировался на данных: (а) наземных оптических и магнитных наблюдений в ночном секторе (наземный сегмент проекта — THEMIS), (б) спутниковых наблюдений физических параметров плазмы хвоста магнитосферы (базовая часть проекта THEMIS) и (в) наземных оптических, магнитных и радарных наблюдений инструментов MIRACLE в утреннем секторе. Умеренные суббури ночного сектора в утреннем секторе развивались на фоне интенсивных геомагнитных  $Pc5$  пульсаций, режим которых менялся после брейкапов вплоть до внезапного их затухания.



**Рис. 1.** Расположение спутников THEMIS в плоскости X-Z GSM (a) и географическая карта используемых обсерваторий (б); темный треугольник – положение проекции спутников THEMIS 18.01.2008 г., а серый – 19.02.2008 г.

## 2. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

### 2.1. Инструменты

Расположение спутников THEMIS (P1-P5) во время выбранных событий было примерно одина-

ковым и для 18 января 2008 г. показано на рис. 1a. Все пять спутников были оснащены идентичными приборами, описание которых дано в работе [Angelopoulos, 2008]. В нашем анализе мы использовали данные индукционного магнитометра

(FGM) и 3-х компонентного измерителя электрического поля (EFI), т.е. скорости регулярного и волнового движения плазмы. Потоки электронов и ионов в диапазоне энергий от 3 эВ до 30 кэВ измерялись электростатическим анализатором (ESA). Данные ESA позволяют определять плотность, скорость и температуру окружающей плазмы. Функции распределения электронов и ионов надтепловых энергий 25 кэВ–6 МэВ измерялись твердотельным телескопом (SST).

Комплекс наземных наблюдений проекта THEMIS включает в себя обширную сеть камер всего неба (ASC) и сеть наземных магнитометров (GMAG), покрывающих Северную Америку от Канады до Аляски ([www.nasa.gov/mission\\_pages/themis/spacecraft/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/spacecraft/index.html)). В утреннем секторе мы использовали данные скандинавского наземного комплекса MIRACLE ([www.fmi.fi/MIRACLE/](http://www.fmi.fi/MIRACLE/)) с сетью камер всего неба (ASC) и магнитометров IMAGE. Также использовались данные сети магнитометров Датского Технического университета в Гренландии ([www.space.dtu.dk](http://www.space.dtu.dk)). Расположение наземных средств вместе с магнитными проекциями координат спутников THEMIS P3 и P5 (для двух событий) показаны на рис. 1б.

## 2.2. Событие 1 (18 января 2008 г.)

Рассмотрим особенности развития геомагнитных возмущений в ночном (обс. SNK, GIL, рис. 2а), утреннем (обс. BJN, NOR, KEV, рис. 2а) секторах магнитосферы, а также в ее хвосте (спутники THEMIS, рис. 3б) и внешней межпланетной среде (солнечном ветре) в интервале 04.30–06.30 UT (рис. 2а и рис. 3).

### 2.2.1 Спутники GEOTAIL и THEMIS

Спутник GEOTAIL находился перед фронтальной частью дневной магнитосферы на расстоянии  $X_{gsm} \sim 26 Re$  и регистрировал высокую скорость солнечного ветра 680–720 км/с. Вариации в ММП были незначительными (рис. 3а), в интервале  $\sim 04.20$ – $04.40$  UT  $B_z$  компонента ММП была близкой к нулю, а  $B_y \sim 2$  нТл и  $B_x \sim -4$  нТл. После  $\sim 04.40$  UT во всех компонентах ММП наблюдались вариации. В  $\sim 05.05$  UT после большого положительного всплеска в  $B_x$ ,  $B_z$  ММП скачком выросла до +4 нТл и на  $\sim 30$  мин оставалась почти неизменной при  $B_y \sim 0$  и  $B_x \sim -3.5$  нТл.

В  $\sim 05$  UT три спутника THEMIS: P3, P4 и P5 (с ростом номера ближе к Земле) находились в ночном секторе. Они располагались на меридиане  $\sim 00.30$  MLT в точках с GSM координатами  $X = -10.3, -9.8$  и  $-8.9 Re$ ,  $Y = -2.4, -1.3$  и  $-1.5 Re$ ,  $Z = -3.9, -3.7$  и  $-3.4 Re$ , соответственно, т.е. были во внутренней части плазменного слоя на переходе от дипольной к вытянутой магнитной конфигурации (рис. 1а). Спутник P2 был на утренней сторо-

не на меридиане  $\sim 02.20$  MLT и расстоянии  $\sim 11 Re$ . Спутник P1 был в хвосте магнитосферы на расстоянии  $\sim 30 Re$ . На нем существенных вариаций не отмечалось. Данные спутников P3 и P5 приведены на рис. 3б.

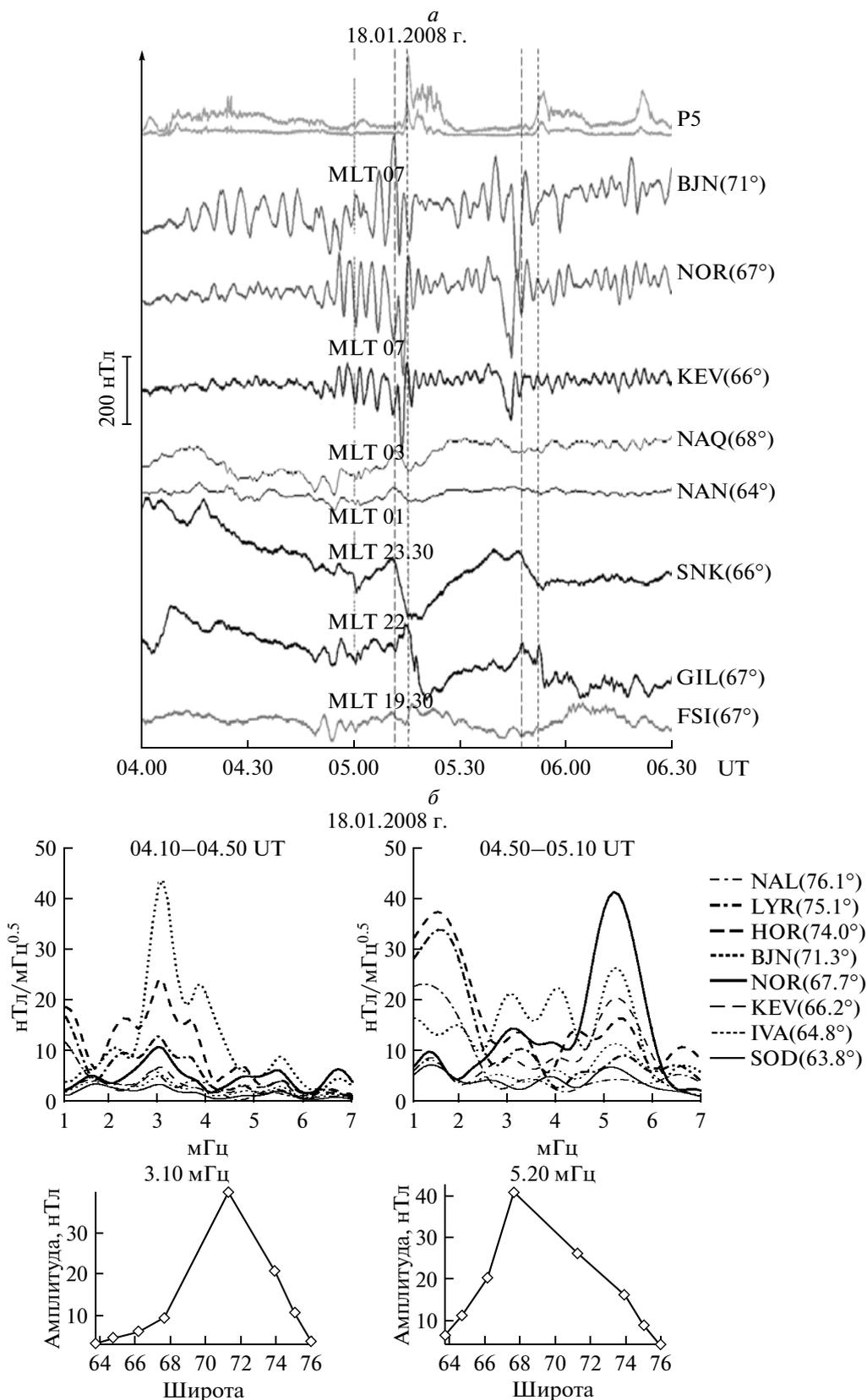
Все спутники THEMIS были внутри плазменного слоя. Об этом свидетельствуют значительные потоки высокоэнергичных частиц (данные не приводятся). Кроме того, спутники P3, P4 и P5 находились вблизи нейтрального слоя. Этот факт следует из близких абсолютных величин компонент магнитного поля  $B_x$  и  $B_z$  (а также  $B_y$ , которая не показана). Градиент магнитного поля  $B_z$  был направлен к Земле, например, в 04.55 UT  $B_z$  на спутнике P5 (ближайшем к Земле)  $B_z \sim 10$  нТл, а  $B_z$  на спутнике P3  $\sim 5$  нТл. В магнитном поле с направленным к Земле градиентом электроны дрейфуют на восток, а ионы на запад.

В 04.58–05.05 UT в  $B_z$  на спутнике P3 видна умеренная вспышка диполизации, как последовательность быстрых скачков величины поля. В некоторый момент  $B_z$  быстро растет, т.е. геомагнитное поле становится ближе к дипольному, а затем возвращается обратно к низким значениям. Это соответствуют конфигурации поля, вытянутого в хвост магнитосферы. После вспышки диполизации в 05.07–05.11 UT модуль  $B_x$  на спутниках P3, P4 и P5 стал расти, т.е. нейтральный слой становился тоньше. Расстояние между спутниками P3 и P4 вдоль  $Z$  координаты было  $\sim 0.5 Re$  и спутники находились по разные стороны от нейтрального слоя (разный знак  $B_x$ ). Начало следующей диполизации наблюдалось в 05.10:00–05.10:30 UT в  $B_z$  на спутнике P5, и в  $\sim 05.12$  UT в  $B_z$  на спутнике P3. Быстрое падение модуля  $B_x$  на спутнике P3 было отмечено в  $\sim 05.12$  UT. Эти моменты близки к началу взрывной фазы суббури в полуночном секторе Земли, как это следует из данных камеры всего неба в обс. GIL (рис. 4) и магнитометра в обс. SNK (рис. 2а).

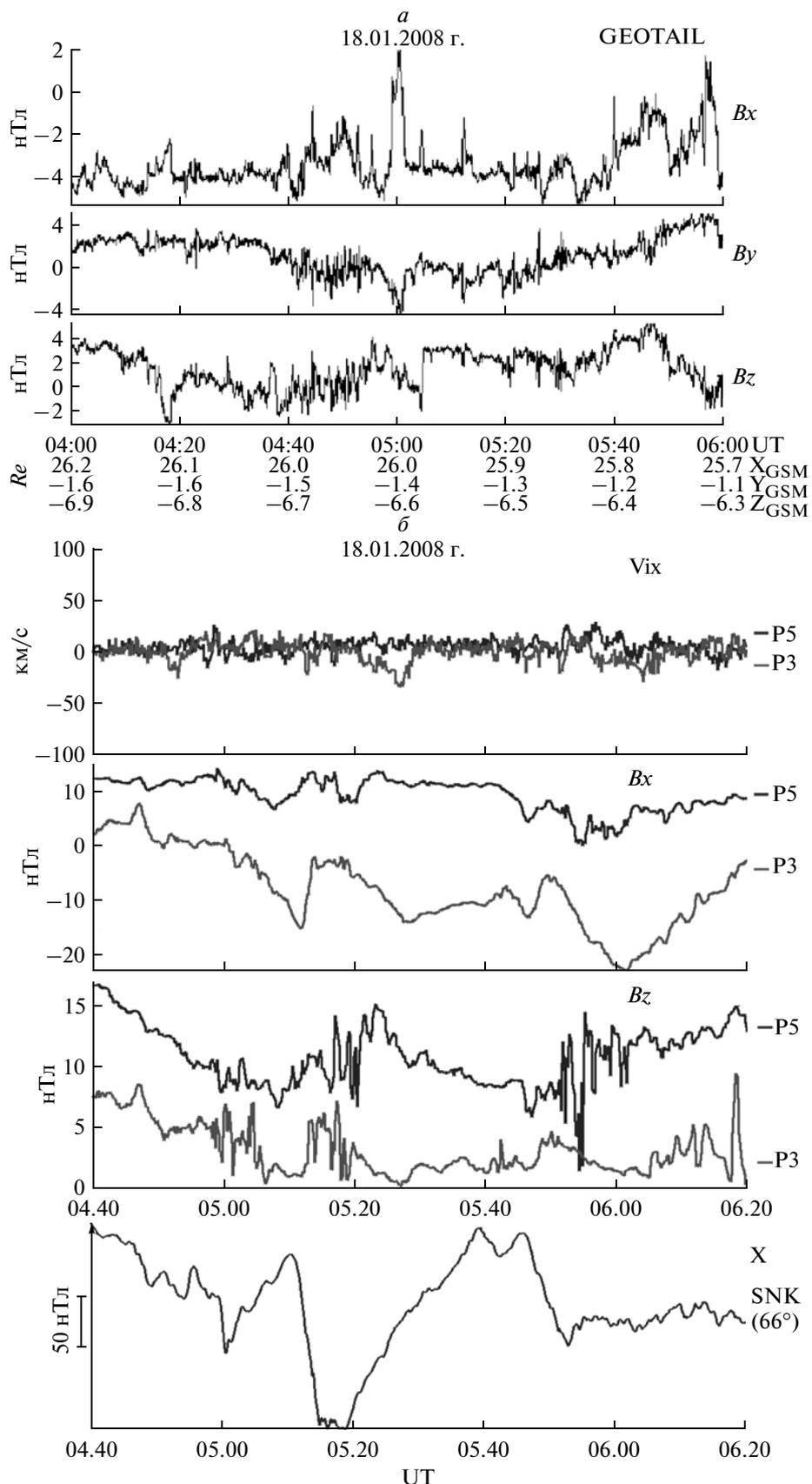
### 2.2.2. Сияния и изолированное магнитное возмущение в 05.11 UT

При анализе этого события мы использовали данные камер всего неба (ASC) обс. FSM ( $\Phi \sim 67.6^\circ$ ), GIL ( $\Phi \sim 66.1^\circ$ ) и SNK ( $\Phi \sim 67^\circ$ ) в вечернем и ночном секторе, и камеры всего неба в обс. NAL ( $\Phi \sim 75.3^\circ$ ) на Шпицбергене в утреннем секторе (рис. 4).

Внезапное уярчение сияний и последующий их бросок к полюсу хорошо виден на ASC камере в обс. GIL в 05.11 и 05.12 UT. Восточнее обс. GIL находится поле зрения ASC камеры в обс. SNK, а западнее – в обс. FSM (рис. 4а). В 05.12 UT в обс. FSM видна западная часть волны свечения, расширяющейся в сторону полюса. В  $\sim 05.13$  UT волна свечения трансформируется в меридиональную полосу (streamer). Ее часть видна на припо-



**Рис. 2.** (а) — данные наземных наблюдений 18.01.2008 г. в утреннем и вечернем секторах, верхний график — поток энергичных электронов на спутнике THEMIS P5, штриховая линия — начало суббури, пунктирная линия — начало высыпаний энергичных электронов; (б) — амплитудные спектры *Pc5* пульсаций и широтное распределение их максимумов.



**Рис. 3.** Данные наблюдений 18.01.2008 г. на спутниках GEOTAIL (*a*) и THEMIS P3 P5 (*b*), нижний график – магнитограмма obs. SNK, находящейся в ночном секторе.

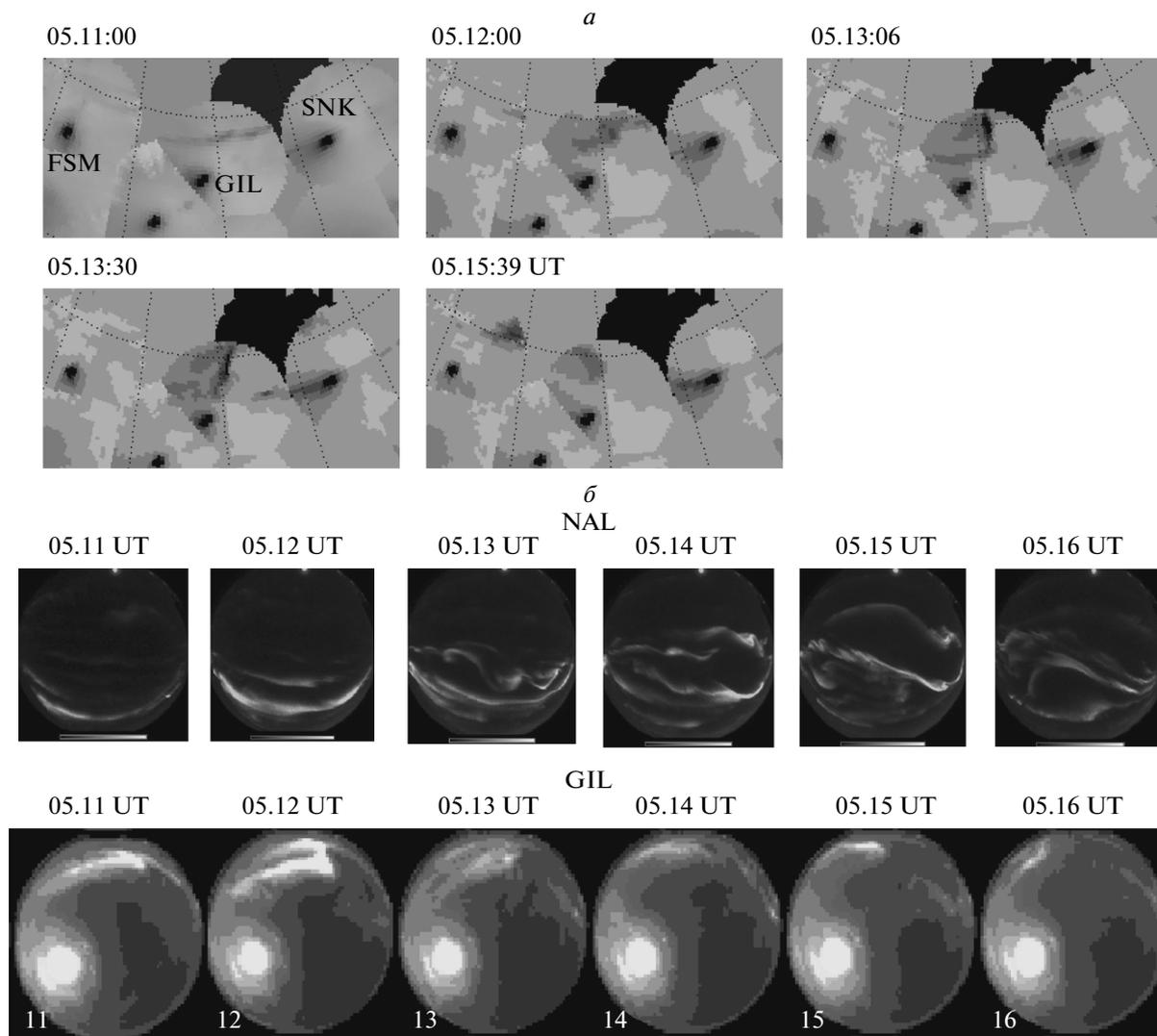


Рис. 4. Карты динамики полярных сияний в ночном секторе, где рисунки приведены в негативе (а); (б) – сопоставление одновременных кадров ASC и утреннем (обс. NAL) и вечернем (обс. GIL) секторах.

люсном краю ASC камеры в обс. SNK. Экваториальная дуга также становится видимой на восточной части поля зрения ASC камеры в обс. SNK, где дуга не скрыта рассеянным светом полной Луны. В ~05.14 UT дуга снова становится волноподобной и ее движущаяся к полюсу западная часть вновь появляется в обс. FSM. Время начала активной фазы суббури по данным ASC камеры в обс. GIL в 05.11 UT (рис. 4б) подтверждается возникновением геомагнитных пульсаций  $Pi2$  ( $f = 20\text{--}50$  мГц) на магнитометрах в обс. GIL (данные не приводятся).

В утреннем секторе Земли авроральная активность наблюдалась на ASC камере в обс. NAL (рис. 4б), расположенной, по-видимому, вблизи приполюсной кромки аврорального овала. В 04.40–06.30 UT регистрировались слабые, непрерывно появляющиеся и исчезающие дуги (иногда волнообразные, с волнами, чаще идущими к

востоку, т.е. в хвост и к флангу магнитосферы). Примерно такие слабые дуги видны на двух верхних снимках на рис. 4б в центральной и приполюсной части поля зрения ASC камеры. Мы выделили активизации, когда дуги, внезапно вспыхивая на экваториальной кромке поля зрения камеры, движутся к полюсу: 04.58–05.00, 05.11–05.20, 05.43–05.47, 05.50–05.55, 05.58–06.02 и 06.15–06.24 UT. Эти интервалы удовлетворительно совпадают с интервалами авроральных активизаций в ночном секторе (не показано) и интервалами диполизаций в  $Bz$  на спутниках THEMIS P3 и/или P5 в хвосте магнитосферы (рис. 3б).

На рисунках 4а, 4б показано начало интервала 05.11–05.20 UT с изолированным брейккапом в ночном и утреннем секторах одновременно: (а) момент уярчения дуг в 05.11 UT, (б) начало движения к полюсу в обс. GIL и появление новой дуги

полусное obs. NAL в 05.12 UT и ( $\theta$ ) направление движения крупномасштабных волновых структур к западу в обоих секторах совпадают во времени и направлении. Точность сопоставления данных составляет 20 с (период съемки ASC камеры в obs. NAL). Начало активной фазы этой умеренной суббури с  $\Delta X \sim 200$  нТл наблюдалось в  $\sim 05.11$  UT в предполуденном секторе в obs. SNK (рис. 2a). В расположенной на 1.5 ч западнее obs. GIL начало суббури отмечалось только спустя  $\sim 4$  мин. В вечернем секторе (obs. FSI,  $\sim 19$  MLT), как и в послеполуденном (obs. NAN,  $\sim 01$  MLT), и в раннем утреннем (obs. NAQ,  $\sim 03$  MLT) эта суббуря практически не наблюдалась, т.е. эпицентр авроральной магнитной активности был очень локализован.

В утреннем секторе (на меридиане сети магнитометров IMAGE,  $\sim 7$  MLT) ночной суббуре в 05.11 UT предшествовали Pc5 пульсации, которые начались в  $\sim 04.10$  UT, рис. 2a. Амплитудные спектры Pc5 пульсаций и пространственное распределение их максимумов показаны на рис. 2б. В интервале 04.10–04.50 UT (на рис. 2б слева) максимум в спектре геомагнитных пульсаций отмечался на частоте 3.1 мГц и геомагнитной широте  $\Phi \sim 71^\circ$ , на которой наблюдалось резкое изменение фазы колебаний (не показано). Такие особенности пульсаций характерны для резонансных колебаний магнитной оболочки, соответствующей широте амплитудного максимума колебаний на земной поверхности. Возбуждению этих пульсаций, как это общепринято, способствовала высокая скорость солнечного ветра и развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на утреннем фланге магнитосферы.

В 04.54 UT геомагнитные пульсации, внезапно усилившись, опустились по широте до  $\Phi \sim 68^\circ$  (obs. KEV-NOR). Спектральный максимум колебаний сдвинулся на 5.2 мHz (рис. 2б, справа). Такие изменения могли быть результатом поджатия магнитосферы, хотя в солнечном ветре существенных вариаций динамического давления не отмечалось. Изменения свойств пульсаций в 04.54 UT совпадало во времени с началом (50–80) нТл геомагнитных вариаций (рис. 2a), которые появились на авроральных широтах в вечернем (obs. FSI,  $\sim 19$  MLT), ночном (obs. GIL,  $\sim 22$  MLT) и раннем утреннем (obs. NAQ,  $\sim 03$  MLT) секторах. После брейкапа в 05.11 UT и появления западного электроджета над obs. GIL, Pc5 пульсации в  $\sim 05.14$  UT внезапно уменьшили амплитуду. Это произошло на 3–4 мин позже начала суббури в околополуденном секторе на obs. SNK.

Явлением, совпадающим с началом быстрого затухания пульсаций, был резкий фронт обширного потока энергичных (30–250 keV) электронов, пришедших в 05.15 UT на спутники THEMIS P3, P4 и P5 одновременно, но с  $\sim 4$ -х минутным запаздыванием от полуденного брейкапа (рис. 2a

вверху). Размеры этого пространственного электронного потока в плоскости утро-вечер были, по крайней мере, больше или равны  $1.7 R_e$ , но меньше  $5.5 R_e$ . На рисунке 2a четко видно, что трижды (в 05.15, 05.52 и 06.20 UT) рост потока энергичных электронов на спутниках THEMIS P3, P4 и P5 совпадал с моментами подавления существующих (или вновь нарастающих) утренних геомагнитных пульсаций в obs. VJN и NOR, что не кажется случайным совпадением. В двух случаях, после брейкапа в 05.11 UT и после следующей активизации в 05.47 UT внезапные усиления потока электронов запаздывали на  $\sim 4$  мин. Спутник P2 был в утреннем секторе на расстоянии  $\sim 5.5 R_e$  от P3. К спутнику P2 электронный поток пришел с запаздыванием на 2–5 мин и обратной зависимостью задержки прихода от энергии. Эта могло быть результатом градиентного дрейфа электронов в магнитном поле с положительным (направленным к Земле) градиентом из ночного сектора к утру (востоку).

Резкое ослабление пульсаций близко к времени появления короткого отрицательного импульса (рис. 2a). Этот импульс определенно связан с крупномасштабными процессами в магнитосфере, поскольку он наблюдался на меридиане магнитометров IMAGE от приполярных до субавроральных геомагнитных широт.

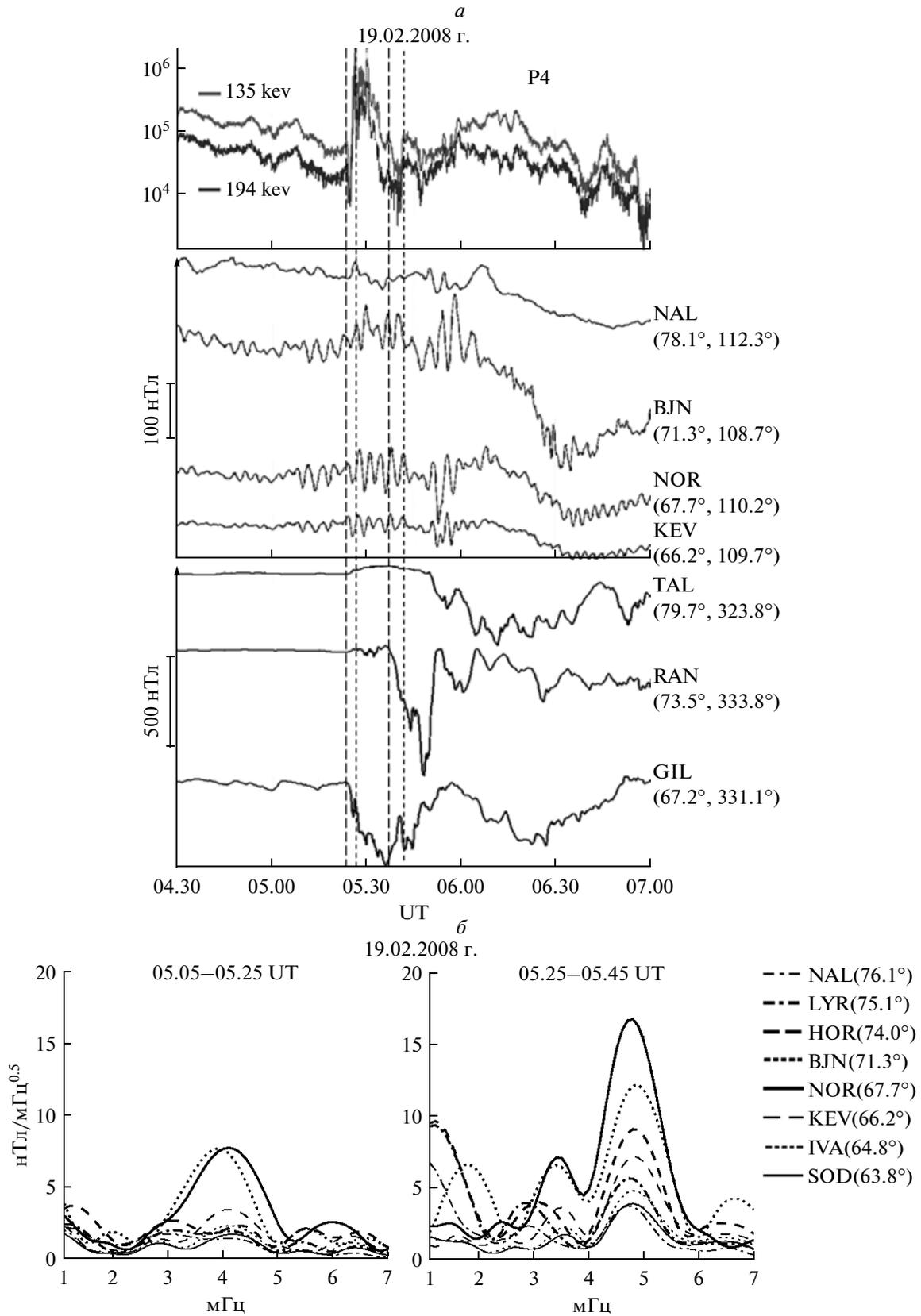
В обсуждаемый период времени в утреннем секторе работали два радара некогерентного рассеяния EISCAT: ESR радар в obs. LYR на Шпицбергене и УКВ (VHF) радар в obs. Тромсе. Наблюдения на ESR радаре выполнялись вдоль магнитной силовой линии на  $\sim 100$  км южнее ASC камеры в obs. NAL, а VHF радар выполнял наблюдения наклонным радиолучом над ESR радаром. Оба радара в период развития активной фазы суббури “видели” в их неподвижных радиолучах авроральные дуги, зарегистрировав рост температуры и электронной плотности в E-слое (не показано). По данным ESR радара плотность электронов достигала  $\sim 2 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

### 2.3. Событие 2 (19 февраля 2008 г.)

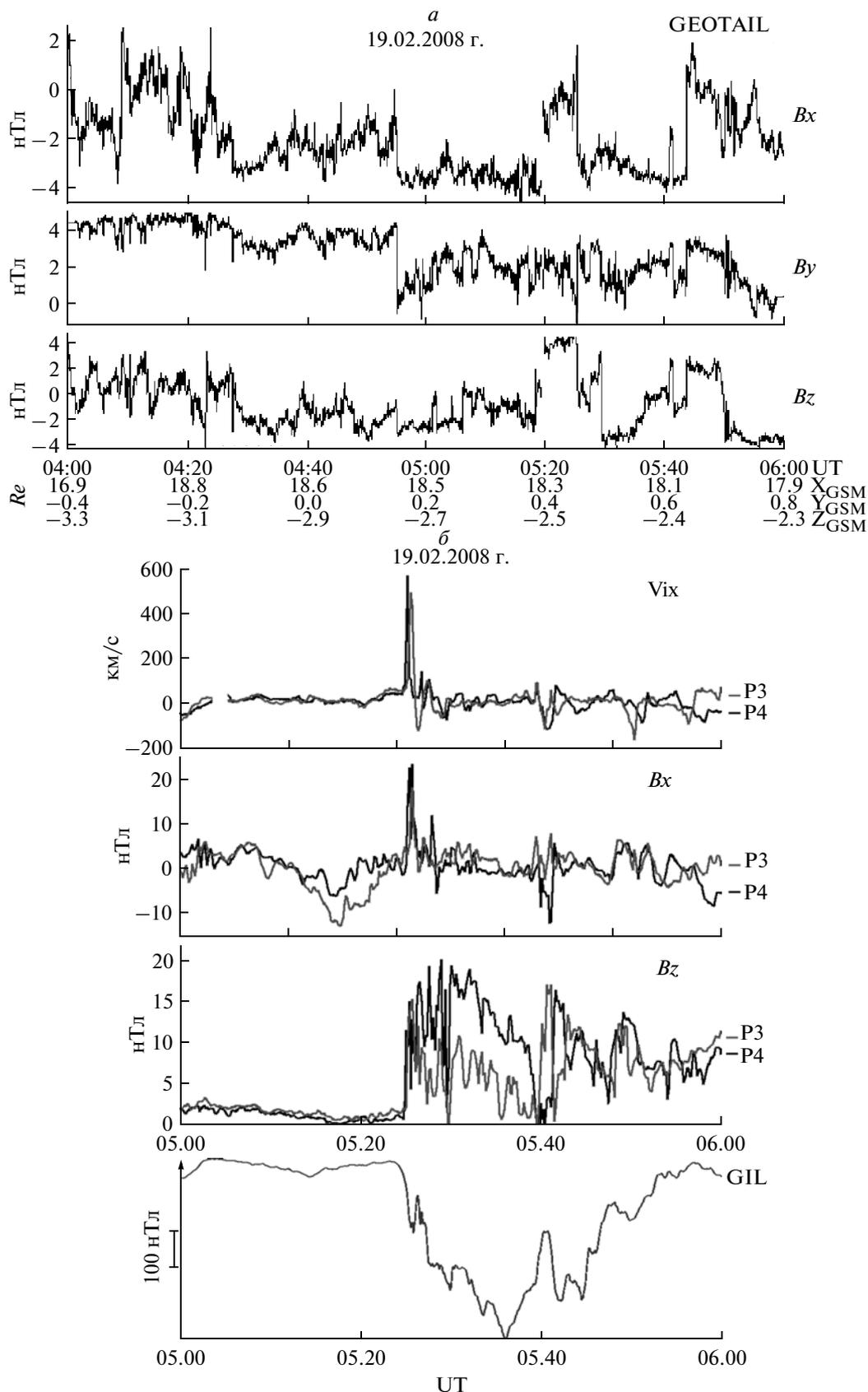
Развитие геомагнитных возмущений по данным спутников GEOTAIL и THEMIS и данным наземных измерений представлены на рис. 5 и 6. Для анализа выбран интервал 04.30–07.00 UT, в котором, как и в первом событии, магнитосферная суббуря наблюдалась в ночном секторе, а и интенсивные геомагнитные Pc5 пульсации в утреннем (рис. 5).

#### 2.3.1 Спутники GEOTAIL и THEMIS

В выбранное время спутник GEOTAIL находился перед фронтальной частью дневной магнитосферы на расстоянии  $X_{gsm} \sim 18 R_e$  и, как в Со-



**Рис. 5.** Данные наземных наблюдений 19.02.2008 г. (как и на рис. 2), верхний график – поток электронов на спутнике THEMIS P4, штриховая линия – начало суббури, пунктирная линия – начало высыпаний энергичных электронов.



**Рис. 6.** Данные наблюдений 19.02.2008 г. на спутниках GEOTAIL (*a*) и THEMIS P3 P5 (*b*), нижний график – магнитограмма obs. GIL ( $\Phi = 67.2^\circ$ ).

бытии 1, регистрировал высокую скорость солнечного ветра (610–620 км/с). При этой скорости и расстоянии солнечный ветер за ~3 мин достигнет траверса Земли. Двум возмущениям в ионосфере и магнитосфере в ~05.25 UT и ~05.40 UT (к которым мы вернемся ниже) предшествовал ~50-мин интервал варьирующего южного ММП со средней величиной  $B_z \sim -1.5$  нТл и  $B_x = -(2.5-4.0)$  нТл. В 05.20 UT ММП резко меняется и на ~5 мин становится северным с  $B_z \sim 4$  нТл и  $B_x \sim 0$ . Этот скачок, вероятно, тот внешний фактор, который способствовал возникновению неустойчивости в хвосте магнитосферы для первого из возмущений События 2. Второму возмущению предшествовал интервал южного  $B_z \sim -4$  нТл и отрицательного  $B_x \sim -4$  нТл, начавшийся в 05.28 UT скачком  $B_z$  к югу. Однако в 05.34–05.37 UT  $B_z$  быстро растет и становится нулевым, сохраняя это значение до возмущения в магнитосфере и ионосфере в ~05.40 UT.

В ~05.30 UT три центральных спутника THEMIS P3, P4 и P5 (как в Событии 1) находились на предполуденной стороне ночного сектора хвоста на меридиане в ~23 MLT с GSM координатами:  $X = -11.2$ ,  $-10.6$  и  $-9.4 Re$ ,  $Y = 1.3$ ,  $2.1$  и  $1.3 Re$ ,  $Z = -3.3$ ,  $-3.5$  и  $-3.1 Re$ , соответственно. Спутник P2 находился к западу от основной группы на меридиане ~21 MLT и на расстоянии ~6.3  $Re$  от спутника P3. На спутниках THEMIS P3–P5 наблюдались диполизации в  $B_z$  компоненте магнитного поля плазменного слоя (рис. 6б), которые резко начались в ~05.25 UT и продолжались ~15 мин, когда на спутниках P3 и P4 величины  $B_z$  приблизились к нулю. Диполизация сопровождалась потоком энергичных электронов (рис. 5а вверху) и быстрыми переменными VBF-подобными потоками плазмы к Земле в хвост магнитосферы со скоростью ~500 и ~200 км/с, соответственно (рис. 6б вверху). В плоскости  $X$ – $Y$  GSM направление векторов скорости плазмы формировало вихрь с наиболее быстрым потоком к Земле на западной стороне вихря на спутнике P4 (~600 км/с). Похожие вихревые потоки обсуждались в работе [Рапов et al., 2010]. Диполизация на спутнике P2 началась на ~2 мин раньше, чем на P3–P5 (не показана), хотя удаление спутника P2 от центральной группы спутников было ~5  $Re$  к вечеру. Возможно, этот факт свидетельствует, что неустойчивость может начинаться на фланге магнитосферы, который непосредственно контактирует с солнечным ветром.

В (05.40–05.42) UT значения  $B_z$  на P3 и P4 вновь резко выросли до ~15 нТл и в течение ~3 мин рост  $B_z$  сопровождался диполизацией и ~120 км/с потоком плазмы в хвост магнитосферы.

### 2.3.2. Полярные сияния

Первая суббурия в полуденном секторе началась в 05.24:40 UT с появлением авроральной дуги, вытя-

нутой в зональном направлении через поле зрения камер всего неба в obs. FSM и GIL ( $\Phi \sim 67^\circ$ ). Примерно через 20 с авроральная дуга стала ярче, и началось ее движение в сторону полюса (данные не приводятся). Брейкап четко виден на магнитометре в obs. GIL (рис. 5а, вертикальная штриховая линия), где он сопровождался интенсивным всплеском  $Pi2$  пульсаций, типичным для брейкапа. Усиление геомагнитных пульсаций  $Pc5$  совпадает с всплеском потока электронов на спутнике THEMIS P4 (рис. 5а вверху), который начался на ~3 мин позже брейкапа.

Эпицентр второй активизации (суббури) в 05.37 UT располагался вблизи или над высокоширотной obs. RAN ( $\Phi \sim 73.5^\circ$ ). Активизация началась со вспышки дуги в поле зрения ASC камеры ( $\Phi \sim 72-73.5^\circ$ ) и независимо обнаруживается по началу (onset) отрицательной бухты в магнитном поле этой обсерватории. Всплеск потока энергичных электронов на спутнике THEMIS P4 был слабее и наблюдался на ~4 мин позже второй активизации. К сожалению, из-за облачности данные о сияниях в утреннем секторе в obs. NAL отсутствуют.

### 2.3.3. Геомагнитные пульсации в утреннем секторе

Как и в первом событии, в утреннем секторе наблюдались резонансные  $Pc5$  геомагнитные пульсации (рис. 5а), спектры которых для различных обсерваторий даны на рис. 5б. До первого брейкапа в ~05.25 UT максимум в спектре пульсаций был на частоте ~4.0 мГц с амплитудой примерно одного порядка в obs. VJN ( $\Phi = 71.3^\circ$ ) и NOR ( $\Phi = 67.7^\circ$ ), т.е. реальный максимум колебаний лежит между ними.

Сразу после первого брейкапа, как в Событии 1, максимум в спектре переместился на частоту 4.7 мГц и геомагнитную широту obs. NOR ( $\Phi = 67.7^\circ$ ). После второй активизации в ~05.37 UT амплитуда  $Pc5$  пульсаций не изменилась, но с новым скачком в потоке электронов в ~05.42 UT внезапно уменьшилась. Это близко к моменту резкого роста электронной температуры  $E$ -слоя (05.43:40 UT) по данным радара ESR на Шпицбергене (не приводятся). В обоих случаях События 2, как в Событии 1, изменение режима  $Pc5$  пульсаций, т.е. их усиление или подавление, изменение частоты и т.п. совпадает по времени с приходом на центральные спутники THEMIS и во внутреннюю магнитосферу резких фронтов повышенного потока энергичных электронов.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оба описанных выше события наблюдались на фоне высокой скорости солнечного ветра (~600–700 км/с), что является благоприятным фактором для развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, основного источника резонансных пуль-

саций  $Pc5$ . В результате неустойчивости возникают волны сжатия (compressional waves) [Rostoker et al., 1998], распространяющиеся к Земле. Часть энергии этих волн фокусируется в энергию резонирующих магнитных  $L$ -оболочек, которые, в свою очередь, могут отдавать ее частицам внешнего радиационного пояса и нагреву ионосферы. Нагрев сопровождается геомагнитными пульсациями  $Pc5$ , которые часто наблюдаются (как в наших событиях) в утреннем секторе. Энергия интенсивных  $Pc5$  пульсаций может составлять примерно 1% от энергии спокойного кольцевого тока [Greenwald and Walker, 1980].

В ряде работ, например, [Афанасьева и др., 1977; Samson and Rostoker, 1981; Rostoker et al., 1984; Kleimenova et al., 2005] найдено, что развитие суббури в ночном секторе может приводить к возбуждению или усилению дневных  $Pc5$  пульсаций. В данной работе показана возможность возникновения противоположного эффекта, когда начало ночной суббури, сопровождаемое авроральным брейкапом, приводит к затуханию резонансных  $Pc5$  пульсаций в утреннем секторе. Это означает, что процессы в магнитосфере, связанные с развитием суббури, могут нарушить, или, наоборот, создать благоприятные условия для возбуждения резонансных колебаний в диапазоне  $Pc5$  пульсаций.

В последние годы, начиная с работы [Rostoker et al., 1998], в литературе широко обсуждается возможность ускорения электронов внешнего радиационного пояса (ВРП), особенно в его приполюсной части, до релятивистских энергий. Авторы заметили, что это происходит при возникновении сильных ультранизкочастотных (ULF) волн в магнитосфере, в частности волн диапазона  $Pc5$ . Очевидно, что при таких взаимодействиях волны должны терять часть своей энергии.

В Событиях 1 и 2 мы рассмотрели эффекты влияния 2-х ночных суббурь и 2-х активизаций на режим утренних  $Pc5$  пульсаций. В 3-х случаях было выявлено подавление и в одном случае усиление  $Pc5$  колебаний на утренней стороне через несколько минут после брейкапа на ночной стороне. Подавление/усиление пульсаций совпадало по времени с внезапным приходом потока энергичных электронов в ночную внутреннюю магнитосферу. Все случаи внезапного изменения режима пульсаций наблюдались при положительных значениях  $V_z$  ММП, что типично для генерации утренних  $Pc5$  пульсаций. Когда в ночном секторе наблюдалось внезапное уярчение дуг полярных сияний и их движение к полюсу, в утреннем секторе регистрировалась похожая авроральная активность на ASC в obs. NAL (Событие 1) и авроральные высыпания в ионосферу по данным ESR радара в obs. LYR и EISCAT УКВ радара в

obs. TRO (Событие 2). В обоих событиях  $Pc5$  пульсации появлялись за 30–60 мин до брейкапа.

Среди возможных причин внезапного затухания пульсаций можно упомянуть влияние ионосферы, в которой с развитием суббури, ростом потока высыпавшихся частиц и проводимости могут увеличиваться потери в точках ионосферного отражения резонансных волн. Кроме того, затухание (усиление) пульсаций может быть связано с изменением топологии магнитных силовых линий в процессе развития магнитосферной суббури [Sergeev et al., 2008]. Реконфигурация силовых линий в ближней части плазменного слоя неизбежно будет происходить при резком уменьшении популяции электронов ВРП (dropout) во время брейкапа, а также при утечках электронов из ВРП в хвост магнитосферы [Borovsky and Denton, 2011]. Импульсивный характер электронных потоков [Akasofu et al., 1971; Rostoker et al., 1998], в том числе в наших событиях, вероятно, связан с тем обстоятельством, что потери энергии магнитосферных пульсаций при взаимодействии (ускорении) электронов ВРП не монотонны во времени. Потери и соответствующее уменьшение добротности магнитосферного альвеновского резонатора, по-видимому, должны быть повышенными в периоды энергичных электронных высыпаний. Отметим, что во время всплесков  $Pc5$  пульсаций резких вариаций скорости солнечного ветра не наблюдалось, т.е. внезапное затухание пульсаций не связано с изменением условий генерации волн за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

Потоки энергичных электронов в хвосте магнитосферы, аналогичные найденным в наших событиях, обсуждались в ряде работ, например, [Baker et al., 2002; Li et al., 2003; Blake et al., 2005]. Особенностью электронных потоков в цитируемых (и наших) событиях был тот факт, что потоки появлялись одновременно на нескольких спутниках, существенно разнесенных по местному времени, радиальному расстоянию и широте. Li et al. [2002] моделировали потоки, наблюдавшиеся в работе [Baker et al., 2002]. Авторы пришли к выводу, что такие потоки могут быть результатом пересоединений магнитных силовых линий в околоземном пространстве. Потоки энергичных электронов из области пересоединения в хвосте магнитосферы, сопровождающие суббурю, наблюдались, например, на спутниках CLUSTER [Taylor et al., 2006; Asnes et al., 2008] и на геостационарных спутниках LANL [Huang et al., 2003].

Заметим, что в Событии 1 скорость плазмы на спутниках THEMIS P3–P5 не превышала  $\sim 50$  км/с, кроме того, не наблюдалось вспышек (BBF) и явных вихревых явлений в скорости, связанных с диполизацией, как, например, в работе [Panov et al., 2010]. Это соответствует недавним исследованиям [Lee et al., 2012], в которых авторы нашли,

что ~50% плазменных потоков (в хвост или из хвоста) обладали скоростями меньше 100 км/с. По их классификации рассмотренное нами Событие 1 можно отнести к категории *W* (слабые потоки не зависимо от их направления), а Событие 2 – к категориям E2 и ET1 – сильный (западный) поток к Земле и умеренный (восточный) поток в хвост.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наземных и спутниковых наблюдений THEMIS в хвосте магнитосферы и данным наземных наблюдений в утреннем секторе (комплекс инструментов MIRACLE) выполнен анализ комплекса явлений, развивавшихся одновременно в вечернем и утреннем секторах магнитосферы и ионосферы в двух событиях 18 января и 19 февраля 2008 г., что позволило описать и частично объяснить ослабление или усиление утренних резонансных геомагнитных *Pc5* пульсаций в ходе развития изолированной суббури в ночном секторе Земли.

Ослабления и усиления пульсаций *Pc5* сопровождалось резкими усилениями потоков энергичных электронов и происходили на фоне диполизации в хвосте магнитосферы на расстояниях порядка 10 *Re*. Потоки электронов приходили одновременно на три центральных спутника THEMIS, существенно разнесенных по местному времени, радиальному расстоянию и широте. Развитие суббурь в ночном секторе происходило по классическому сценарию, в котором брейккап начинался с внезапного уярчения экваториальной дуги сияний и последующего движения дуги к полюсу, а в утреннем секторе (Событие 1) регистрировалось похожее развитие авроральной активности и авроральные высыпания в ионосферу.

Мы предполагаем, что среди возможных причин внезапного затухания/усиления *Pc5* пульсаций можно назвать: (а) рост проводимости ионосферы, вызванный высыпаниями во время развития суббури и, как следствие, увеличение потерь в области ионосферного отражения резонансной волны; (б) изменение конфигурации резонансных магнитных силовых линий, вызванное изменениями топологии ближней части плазменного слоя и магнитосферы в процессе развития суббури; (в) изменение условий магнитосферного резонанса при высыпании энергичных электронов из радиационного пояса во время брейккапа, а также при возможных утечках таких электронов в хвост магнитосферы.

Авторы благодарны всем сотрудникам, обеспечивающим наблюдения на наземных сетях IMAGE, MIRACLE, EISCAT и всех инструментах проекта THEMIS. Работа Н.Г. Клейменовой и О.В. Козырева проводилась при поддержке Про-

граммы № 22 Президиума РАН, Программы № 7 ОНЗ РАН гранта РФФИ № 13-05-00233. Работа С.В. Дубягина была поддержана грантом Академии Наук Финляндии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева Л.Т., Распопов О.М., Киселев Б.В. Пространственно-временные характеристики геомагнитных пульсаций типа *Pc5* // Структура магнитосферных, ионосферных и авроральных возмущений. Л.: Наука, С. 108–115. 1977.
- Angelopoulos V. The THEMIS Mission // Space Sci. Rev. V. 141. P. 5–34. doi:10.1007/s11214-008-9336-1. 2008.
- Asnes A. et al. Multispacecraft observation of electron beam in reconnection region // J. Geophys. Res. V. 113. A07S30. doi:10.1029/2007JA012770. 2008.
- Baker D.N. et al. Timing of magnetic reconnection initiation during a global magnetospheric substorm onset // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 24. doi: 10.1029/2002GL015539. 2002.
- Baker G.E. Donovan E.F., Jackel B.J. A Comprehensive survey of auroral latitude *Pc5* pulsations characteristics // J. Geophys. Res. V. 108. doi:10.1029/2002JA009801. 2003.
- Blake J.B., Mueller-Mellin R., Davies J.A., Li X., Baker D.N. Global observations of energetic electrons around the time of substorm 27 August 2001 // J. Geophys. Res. V. 110. A06214. doi:10.1029/2004JA010971. 2005.
- Borovsky J.E., Denton M.H. Evolution of the magnetotail energetic-electron population during high-speed-stream-driven storms: Evidence for the leakage of the outer electron radiation belt into the Earth's magnetotail // J. Geophys. Res. V. 116. A12228. doi:10.1029/2011JA016713. 2011.
- Greenwald R.A., Walker A.D.M. Energetics of long period resonant hydromagnetic waves // Geophys. Res. Lett. V. 7. № 10. P. 745–748. 1980.
- Heikkila W. Earth's magnetosphere formed by the low-latitude boundary layer. The Lienard-Wiechert, Elsevier. P. 127–128, 146. 2011.
- Huang C.-S., Foster J.C., Reeves G.D., Le G., Frey H.U., Pollock C.J., Jahn J.-M. Periodic magnetospheric substorms: Multiple space-based and ground-based instrumental observations // J. Geophys. Res. V. 108. A11. doi: 10.1029/2003JA009992. 2003.
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Manninen J., Ranta A. Unusual strong quasi-monochromatic ground geomagnetic *Pc5* pulsations in the recovery phase of November 2003 superstorm // Ann. Geophys. V. 23. P. 2621–2634. 2005.
- Lee D.-Y., Kim H.-S., Ohtani S., Park M.Y. Statistical characteristics of plasma flows associated with magnetic dipolarizations in the near-tail region of  $r < 12 R_E$  // J. Geophys. Res. V. 117. A01207. doi:10.1029/2011JA017246. 2012.
- Li X., Sarris T.E., Baker D.N., Peterson W.K., Singer H.J. Simulation of energetic particle injections associated with a substorm on August 27, 2001 // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 1. doi:10.1029/2002GL015967. 2003.
- Mathie R.A., Mann I.R., Menk F.W., Orr D. *Pc5* ULF pulsations associated with waveguide modes observed

- with the IMAGE magnetometer array // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 7025–7036. 1999.
- *Mitchell D.G., Engebretson M.J., Williams D.J., Cattell C.A., Lundin R.* *Pc5* pulsations in the outer dawn magnetosphere seen by ISEE 1 and 2 // *J. Geophys. Res.* V. 95. P. 967–976. 1990.
  - *Panov E.V. et al.* Multiple overshoot and rebound of a bursty bulk flow // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. L08103. doi:10.1029/2009GL041971. 2010.
  - *Rostoker G., Spadinger I., Samson J.C.* Local time variations in the response of *Pc5* pulsations in the morning sector to substorm expansive phase onsets near midnight // *J. Geophys. Res.* V. 89. № A8. P. 6749–6757. 1984.
  - *Rostoker G., Skone S., Baker D.N.* On the origin of relativistic electrons in magnetosphere associated with some geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 19. P. 3701–3704. 1998.
  - *Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Baker K.B., Samson J.C.* HF radar observations of *Pc5* field line resonances in the midnight/ early morning MLT sector // *J. Geophys. Res.* V. 96. P. 15697–15710. 1991.
  - *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.
  - *Samson J.C., Harrold B.G., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Walker A.D.M.* Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 19. P. 19441–19444. 1992.
  - *Sergeev V.A. et al.* Study of near-Earth reconnection events with Cluster and Double Star // *J. Geophys. Res.* V. 113. A07S36. doi:10.1029/2007JA012902. 2008.
  - *Taylor M.G.T. et al.* CLUSTER encounter with energetic electron beam during substorm // *J. Geophys. Res.* V. 111. A11203. doi:10.1029/2006JA011666. 2006.
  - *Walker A.D.M., Greenwald R.A., Stuart W.F., Green C.A.* STARE auroral radar observations of *Pc5* geomagnetic pulsations // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 3373–3388. 1979.
  - *Ziesolleck C.W.S., McDiarmid D.R.* Statistical survey of auroral latitude *Pc5* spectral and polarization characteristics // *J. Geophys. Res.* V. 100. A10. P. 19299–19312. 1995.