

УДК 550.338.1

## ГЕОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 13 ДЕКАБРЯ 2006 г.

© 2011 г. Н. А. Золотухина, **О. М. Пирог**, Н. М. Полех

Учреждение РАН Институт солнечно-земной физики СО, Иркутск

e-mail: zolot@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 17.12.2009 г.

После доработки 11.01.2011 г.

Исследованы возмущения магнитного поля, магнитосферной и ионосферной плазмы, зарегистрированные 14–16.12.2006 г. во время большой магнитной бури, вызванной солнечной вспышкой балла 4В/Х3.4. Показано, что взаимодействие магнитосферы Земли с областью высокого динамического давления солнечного ветра привело на севере Якутии к формированию спорадических слоев в  $E$  и  $F$ -областях ионосферы, к понижению критической частоты  $F2$ -слоя и полному поглощению. В конце главной фазы магнитной бури зафиксированы аномально высокие значения  $foF2$ , превышающие в 1.5–1.7 раза спокойный уровень. Обнаружено, что возмущения, зафиксированные наземными обсерваториями, развивались на фоне изменений температуры, плотности иpitch-углового распределения частиц на геостационарной орбите, свидетельствующих о радиальном смещении магнитосферных структур (магнитопаузы, каспа/клефта, плазменного слоя) относительно наблюдательных пунктов. Сделан вывод о том, что в данном случае изменения околоземной плазмы и магнитного поля отражают динамику физических условий на границе магнитосферы и суточное вращение Земли.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 02:27–02:55 УТ 13.12.2006 г. на Солнце произошла вспышка балла 4В в  $H_{\alpha}$ , сопровождавшаяся сильным (балл Х3.4) рентгеновским излучением, радиовсплесками II и IV типов, повышением потоков протонов в каналах 0.8–80 МэВ и потоков нейтронов [McKenna-Lawlor et al., 2008; Шестопалов и Харин, 2008; Abbasi et al., 2008]. Ионосферные эффекты вспышки проявились сразу после ее начала в росте интенсивности сигналов, отраженных от нижних слоев высокоширотной ионосферы, флуктуациях полного электронного содержания (ПЭС) и в сбоях радиосвязи [Tereshchenko et al., 2007; Афраймович и др., 2009].

Через 36 часов взаимодействие магнитосферы Земли с межпланетной неоднородностью, созданной вспышечным выбросом, привело к большой магнитной буре. Ионосферные возмущения, зарегистрированные в ходе бури на средних и в низких широтах, уже рассмотрены в научных статьях. В работе [Lei et al., 2008a] исследовано положительное ионосферное возмущение, проявившееся в росте ПЭС, электронной плотности ( $NmF2$ ) и высоты ( $hmF2$ )  $F2$ -слоя ионосферы над средне/низкоширотными областями Америки и Африки в начальную фазу бури. Авторы показали, что главный вклад в генерацию указанных возмущений внесли изменения магнитосферного электрического поля. В отличие от них квазипериодические вариации ПЭС,  $NmF2$  и  $hmF2$ , наблюдавшиеся над Япо-

нией 15 декабря 2006 г. в восстановительную фазу бури, возникли под действием нейтрального ветра [Lei et al., 2008b]. Положительное возмущение 15 декабря 2006 г. также было зафиксировано в Восточной Сибири по данным сети вертикального и наклонного зондирования в работе [Kurkin et al., 2008].

Возмущения высокоширотной ионосферы 13–14.12.2006 г. рассмотрены в работе [Tereshchenko et al., 2007]. Авторы отметили связь между изменениями электронной плотности в  $D$ -области ионосферы над обс. Туманный (69.0°N, 35.7°E) и вариациями потока высокоэнергичных протонов, излучаемых вспышечной областью. Имеющиеся у нас экспериментальные данные показывают, что взаимодействие вспышечной неоднородности с магнитосферой Земли тоже привело к значительным возмущениям высокоширотной ионосферы, исследование которых является основной целью данной работы.

Вариации электронной концентрации в высокоширотной дневной ионосфере обычно связывают с высыпаниями частиц из каспа, плазменной мантии, низкоширотного пограничного и плазменного слоев [Ma et al., 2002]. В нашей работе мы покажем, что модуляция высыпаний из этих областей, их радиальное смещение в условиях высокого динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) и усиленной напряженности электрического поля магнитосферной конвекции ( $E_c$ ) вызвали 14–15.12.2006 г. возму-

**Таблица.** Названия, коды и геомагнитные координаты наблюдательных пунктов

Обсерватория/спутник	Код	Координаты	
		φ', град	λ', град
Чокурдах	CHD	62.0	206.8
Тикси	ТИК	61.8	193.7
Норильск	NOK	59.4	166.0
Зырянка	ZYK	57.5	211.1
Жиганск	ZGN	56.8	190.7
Якутск	YAK	52.3	196.3
Магадан	MGD	51.9	213.4
LANL-01A	L1	67.2	89.6
LANL-02A	L2	61.5	151.1
LANL-97A	L7	63.9	210.9
LANL 1994_084	L4	66.7	272.6
LANL 1989–046	L9	66.6	286.4
GOES_11	G11	66.1	294.1
GOES_12	G12	65.0	349.3

щения электронного содержания  $E$  и  $F$ -областей как дневной, так и ночной высокоширотной ионосферы. В частях 2, 3 мы дадим краткое описание исходных данных, структуры межпланетной вспышечной неоднородности и геомагнитной обстановки. В 4-ой и 6-ой частях будут представлены ионосферные и геомагнитные возмущения, зарегистрированные на севере Якутии, в части 5 – возмущения, зарегистрированные геостационарным спутником LANL-97A вблизи меридиана ионосферных измерений. В части 7 мы обсудим возможную связь ионосферных возмущений с вариациями плазмы и магнитного поля в солнечном ветре и на геостационарной орбите, в части 8 перечислим основные результаты проведенного исследования.

## 2. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования воздействия вспышечного потока на состояние системы магнитосфера–ионосфера проведен анализ характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), магнитного поля и магнитосферной плазмы на геостационарной орбите (сайт [http://cdaweb.gsfc.na-sa.gov/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.na-sa.gov/istp_public)), геомагнитных индексов (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>) и наземной информации о параметрах геомагнитного поля и ионосферы на севере Якутии. Ионосферные данные Магадана взяты на <http://www.wdcb.ru/stp/data/>. Якутские данные любезно предоставлены нам сотрудником

ми ИКФИА и частично опубликованы на сайте <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/>. Для корректного проведения анализа географические координаты наблюдательных пунктов пересчитаны в исправленные геомагнитные с помощью программы, размещенной на сайте <http://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-in/sscweb/CoordCalculator.cgi>. В таблице приведены геомагнитные координаты обсерваторий и северного основания силовой линии геомагнитного поля, проходящей через спутник.

Положение обсерваторий и границ аврорального овала в геомагнитной системе координат показано на рис. 1 для момента 01 UT 15.12.2006 г. Географические координаты границ аврорального овала взяты на [http://sd-ww.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation\\_display.html](http://sd-ww.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html).

## 3. ВСПЫШЕЧНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ

Основные характеристики межпланетной структуры, созданной вспышкой, представлены на трех верхних панелях рис. 2. Вариации  $P_{sw}$ , модуля  $B_t$ ,  $B_z$  и  $B_y$ -компонент ММП, построенные по данным ИСЗ ACE, сдвинуты на время распространения солнечного ветра со скоростью  $V_x$  от точки измерения  $x$  до подсолнечной точки магнитопаузы. Введена шестиминутная поправка, определенная путем сопоставления данных ИСЗ ACE, сдвинутых на  $x/V_x$ , с началом SSC.

Вспышечный поток состоит из трех основных структур, характерных для геоэффективных межпланетных образований. Это: (i) – ударная волна (~14:14–14:16 UT) с резким скачком  $P_{sw}$  и  $B_t$ ; (ii) – область сжатого солнечного ветра и ММП (~14:16–23:30 UT), также называемая переходной областью; (iii) – собственно вспышечный выброс с медленно меняющимся ММП южного направления и относительно низким  $P_{sw}$  [Pudovkin et al., 1979; Gonzalez et al., 2002]. Амплитуды флуктуаций динамического давления в магнитослое Земли, зарегистрированные спутником Geotail, в 3–6 раз больше амплитуд, наблюдавшихся в солнечном ветре.

На панелях рис. 2*d–e* показаны вариации индексов, характеризующих геомагнитную возмущенность. Видно, что магнитосфера отреагировала на вспышечный поток большой магнитной бурей с двумя минимумами  $Dst = -39$  нТл в 18 UT 14.12.2006 г. и  $Dst = -146$  нТл в 07 UT 15.12.2006 г., начавшейся на фоне усиленного кольцевого тока ( $Dst/SYM-H \sim -10$  нТл). В максимуме бури значения  $SYM-H$  индекса (рис. 2*d*) заметно отличаются от соответствующих им по времени значений  $Dst$ . Они минимальны ( $SYM-H \leq -200$  нТл) в 00:41–00:59 UT 15.12.2006 г.

Судя по планетарному  $K_p$ , авроральным ( $AU$ ,  $AL$ ) и  $Dst$ -индексам, геомагнитная активность резко

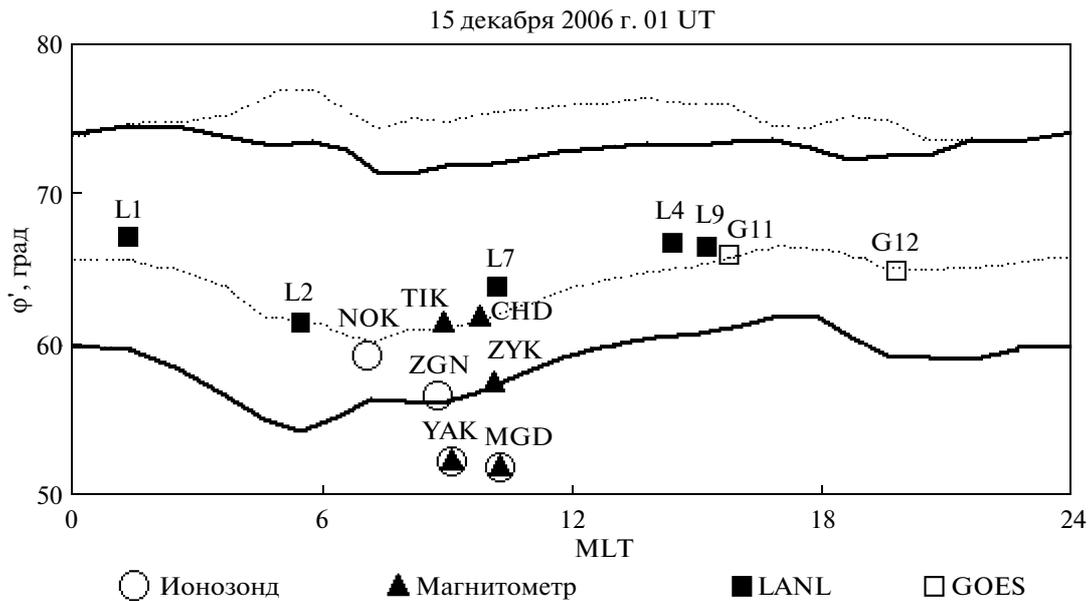


Рис. 1. Карта расположения наблюдательных пунктов.

возросла в 14:14 UT после прихода ударной волны и в ~23:30 UT после перехода Земли непосредственно во вспышечный выброс. Она была максимальна в начале суток 15.12.2006 г. (на рис. 2 в 24–27 UT). Максимум геомагнитной активности совпадает по времени с максимумом  $E_s$ , рассчитанным по скорости солнечного ветра и  $B_z$  и  $B_y$ -компонентам ММП [Doyle et al., 1983].

#### 4. ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

На рис. 3а для 14–15 декабря показаны вариации критических частот ( $foF_2$ ), высот максимума слоя  $F_2$  ( $hmF_2$ ), предельных частот ( $foEs$ ) и высот максимума спорадических слоев ( $h'Es$ ), построенные по данным 15-минутных измерений ионосферных станций Норильск, Жиганск и Якутск. Отдельно на рис. 3б для 14–16.12.2006 г. приведены вариации  $foF_2$ , построенные по 15-минутным данным Магадана. Для станций Жиганск и Якутск тонкой линией показаны изменения  $foF_2$ , полученные усреднением по магнитоспокойным дням 5 и 17 декабря. В рассматриваемые дни на станциях Норильск и Жиганск была полярная ночь. Световой день в Якутске продолжался с 01:00 до 05:45 UT, в Магадане – с 23:10 до 04:45 UT.

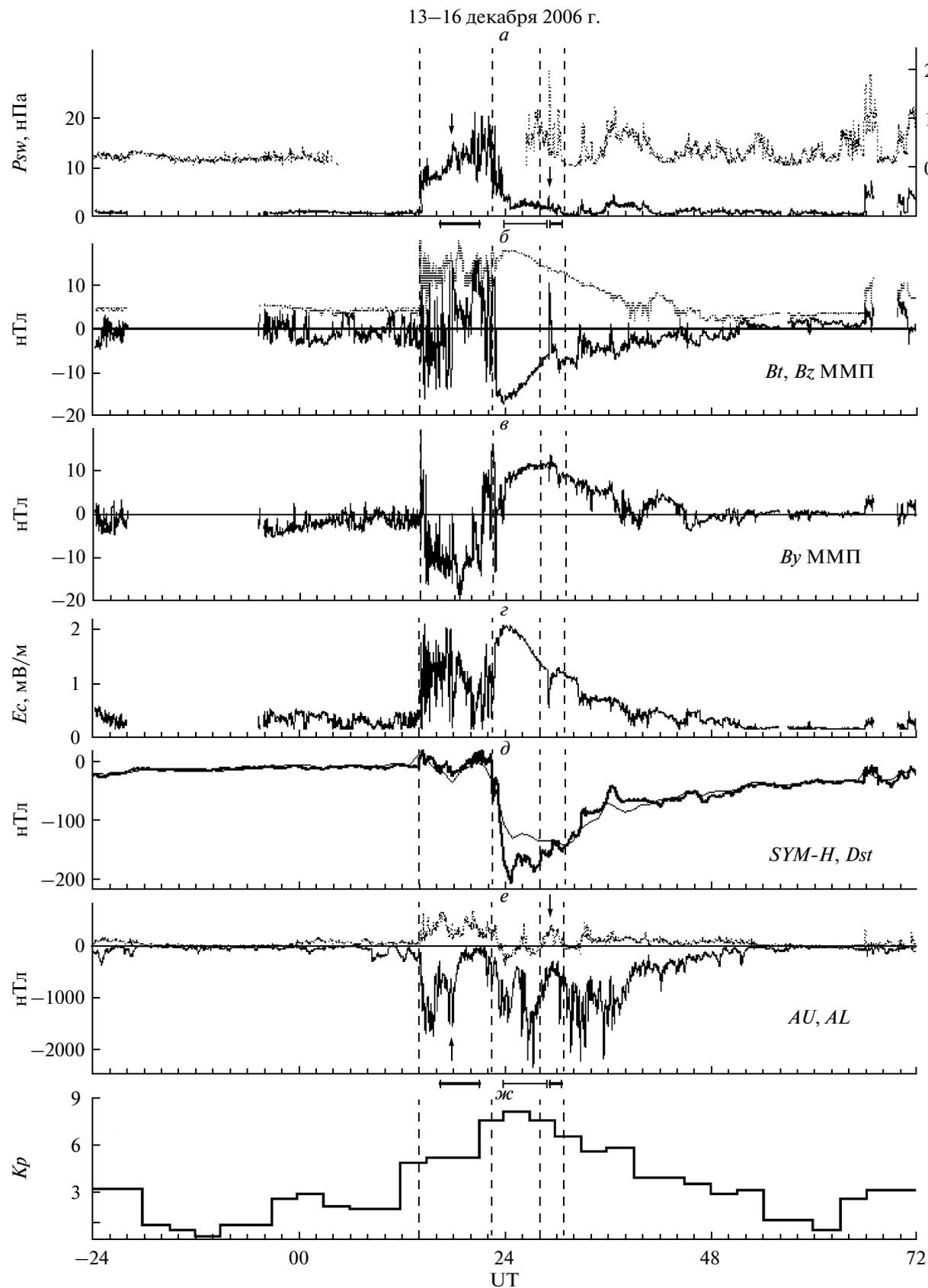
Анализ ионосферных данных показывает, что в последующие после SSC 18 часов изменения структуры высокоширотной ионосферы могут быть разбиты на 3 характерных интервала.

**I. 14:30–22:30 UT 14.12.** Ионосферные станции находятся в предполуденно-утреннем секторе. Для

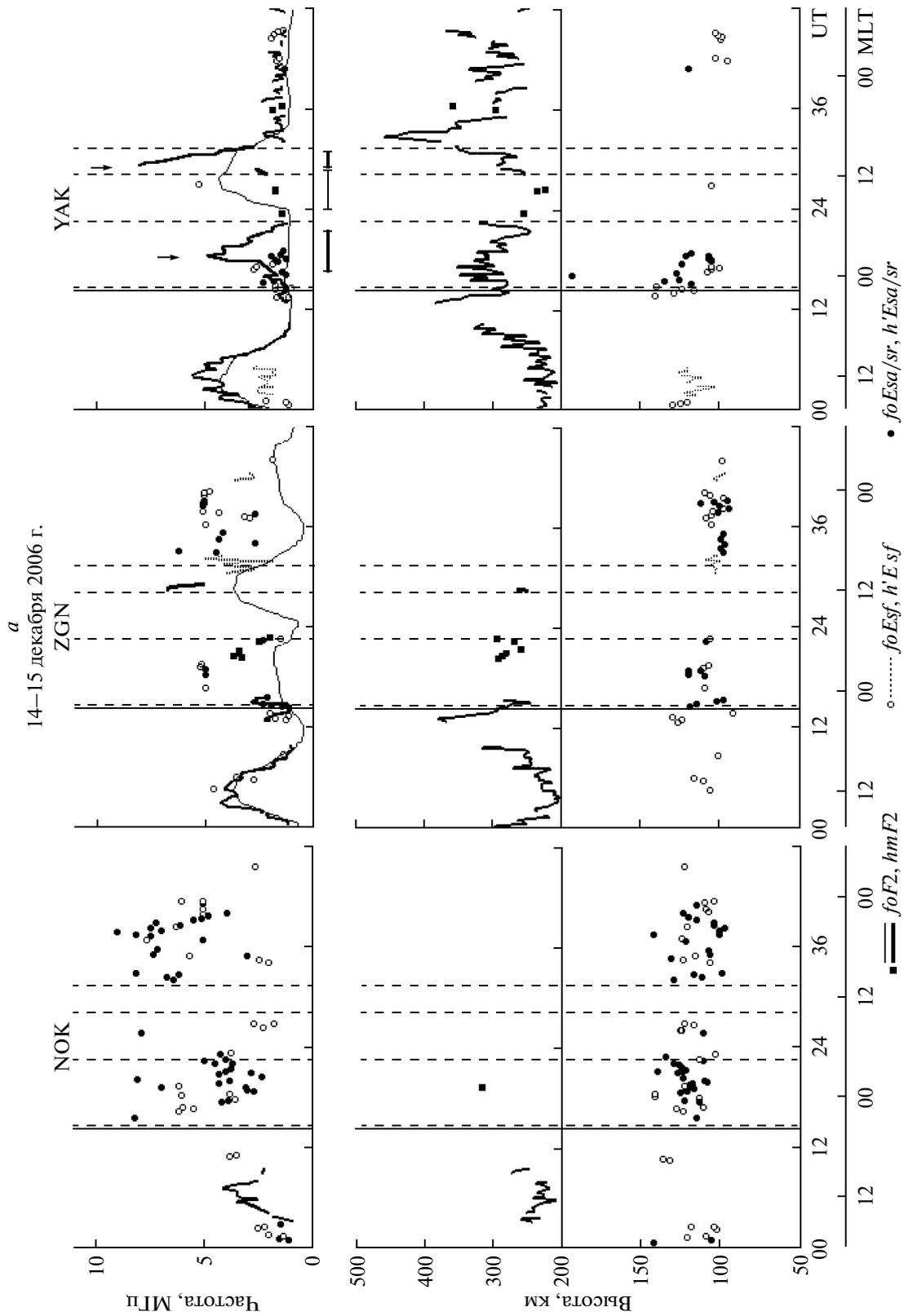
этого интервала характерно положительное ионосферное возмущение  $F_2$ -слоя и формирование спорадических  $E$ -слоев, связанных с высыпаниями жестких ( $Esa$ ) и мягких заряженных частиц ( $Esr$ ).

Начало роста  $foF_2$  и переход от плоских ( $Esf$ ) к  $Esa$  и  $Esr$ -слоям зафиксированы сначала в Жиганске в 14:30 UT, затем в Якутске в 15:00 UT. В Жиганске  $F_2$ -слой наблюдался непрерывно до 15:15 UT, потом эпизодически в 20:30–21:15 UT и в 22:30–22:45 UT. Периоды наблюдения  $F_2$ -слоя чередуются с тремя интервалами полного поглощения и продолжительным интервалом экранировки  $F$ -области спорадическим  $E$ -слоем (18:15–19:30 UT). Наибольшее для данного положительного возмущения значение  $foF_2$ , равное 4.1 МГц, зафиксировано в 20:45 UT после полного поглощения. В Якутске измеренные ионосферные параметры более стабильны. Слой  $F_2$  с высокой критической частотой наблюдается непрерывно до 22:15 UT и в 23:30 UT. С 15 UT величина  $foF_2$  увеличивается, достигая максимума 5.7 МГц в 17:45 UT, и остается на уровне 5 МГц до 18:45 UT.

На обеих станциях рост  $foF_2$  сопровождается образованием понижающихся по высоте  $Es$ -слоев. В Жиганске это слой  $Esr$ , отмеченный в 14:30–15:15 UT, в Якутске – слой  $Esa$  в 15 UT, а затем, до 17:45 UT,  $Esr$  и  $Esf$ -слои. Таким образом, во время положительного ионосферного возмущения станции Жиганск и Якутск находились в зоне диффузных высыпаний. Судя по продолжительности уменьшения  $h'Es$ , энергия частиц, поступающих в  $E$ -область ионосферы над Якутском, увеличивалась вплоть до 18:45 UT, а над Жиганском – только в течение часа.



**Рис. 2.** Вариации: а — динамического давления в солнечном ветре (сплошная линия, спутник ACE, левая шкала) и в магнитослое (штриховая линия, спутник Geotail, правая шкала); б — модуля ( $B_t$ , штрихи) и  $B_z$ -компоненты ММП (сплошная линия); в —  $B_y$ -компоненты ММП; г — поля магнитосферной конвекции; д —  $SYM-H$  и  $Dst$ -индексов (толстая и тонкая линии соответственно); е —  $AU$  и  $AL$ -индексов (штриховая и сплошная линии); жс —  $K_p$ -индекса. Значение UT = 0 соответствует 00 UT 14.12.2006 г.



**Рис. 3.** (а) — Изменения ионосферных параметров в Норильске, Жиганске и Якутске. Здесь и на других рисунках темными стрелками отмечены максимумы  $foF2$ , зарегистрированные во время двух положительных ионосферных возмущений в Якутске (показаны отрезками толстых линий), отрезком тонкой линии — отрицательное ионосферное возмущение, сплошной и штриховыми вертикальными линиями — момент SSC и границы трех интервалов ионосферных возмущений. (б) — Изменения критической частоты  $F2$ -слоя над Магаданом. Интервалы положительных и отрицательных возмущений здесь и на других рисунках отмечены темными и светлым прямоугольниками, максимум  $foF2$  — светлой стрелкой.



интервале 04:45–06:15 UT вновь наблюдалось полное поглощение, сменившееся отражениями от экранирующего *Esf*-слоя.

В Якутске в 04:15–07:15 UT зарегистрирован *F2*-слой с критической частотой, резко возраставшей от 3.45 МГц в 04:45 UT до 8.85 МГц в 05:15 UT. Затем частота слоя уменьшилась до значения 3.55 МГц, близкого к спокойному уровню. Наибольшее значение *foF2* зафиксировано в 05:15 UT за 30 мин до захода Солнца. Оно в 2 раза выше спокойного и, возможно, также как в Жиганске, не максимально, так как наблюдалось после сеанса полного поглощения (05:00 UT).

Во время аномально высокой ионизации *F2*-слоя над Жиганском, Якутском и Магаданом, ст. Норильск оставалась в зоне полного поглощения. Здесь отражения от *Esa* и *Esf* появились после 08 UT 15.12.

В Магадане в 04–06 UT 15.12. зарегистрировано второе, более значительное положительное возмущение с максимумом *foF2*, равным 10.8 МГц в 04:30 UT, за 15 мин до захода Солнца.

Для краткости дальнейшего изложения указанные выше характерные интервалы обозначены следующим образом: I – активизация авроральных высыпаний и развитие положительного возмущения в ночной высокоширотной ионосфере; II – полное поглощение и развитие отрицательного возмущения в утренне-полуденном секторе высокоширотной ионосферы; III – появление интенсивного положительного возмущения в дневной высокоширотной ионосфере.

Следует отметить, что после 07:15 UT 15 декабря ионосферные параметры, определенные по данным вертикального зондирования, близки к наблюдаемым в магнитоспокойных условиях на всех станциях кроме Норильска, несмотря на высокий уровень авроральной геомагнитной активности (см. рис. 2e).

## 5. ВОЗМУЩЕНИЯ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Эволюция параметров магнитосферной плазмы во время ионосферных возмущений рассмотрена по данным спутника L7, северное основание силовой линии которого находилось во время изучаемого события на 20° восточнее, 7°/11° севернее ионосферных станций Жиганск/Якутск и на 2°/12° западнее/севернее Магадана (рис. 1). Вариации средних 15-минутных значений плотности, радиальной скорости, температуры и степени анизотропии температур частиц магнитосферной плазмы показаны на рис. 4 (панели б–е). Значения MLT соответствуют положению спутника. Для обозначения максимумов критической частоты *F2*-слоя, времени регистрации положительных и отрица-

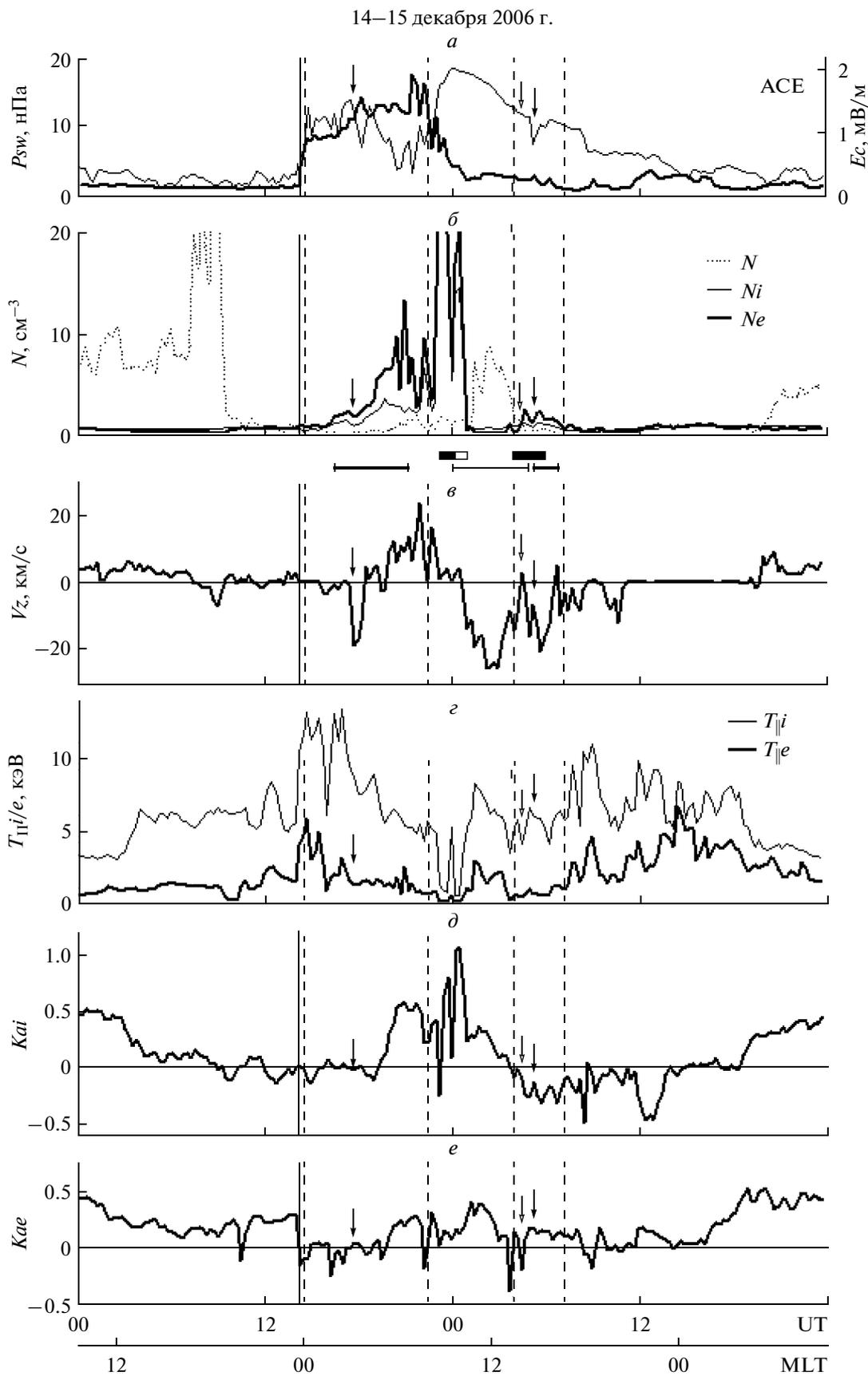
тельных ионосферных возмущений использованы символы, примененные на рисунках 3а, б.

Из значений  $T_{\parallel i} \sim 6$  кэВ,  $K_{ai} \sim 0$  и  $T_{\parallel e} \sim 1.7$  кэВ,  $K_{ae} \sim 0.25$ , зарегистрированных до 14 UT (23:30 MLT) 14.12.2006 г., следует, что перед SSC спутник находился в плазменном слое с изотропным и поперечно-анизотропным температурным распределением ионов и электронов соответственно. В интервале увеличения  $P_{sw}$  от 1 до 7.5 нПа, включающем SSC (14:00–14:30 UT, сектор 23:30–24:00 MLT), температура ионов/электронов выросла от 5/1.5 кэВ до 12/5 кэВ. У ионов степень анизотропии температур не изменилась, у электронов значения  $K_{ae}$  резко понизились от  $\approx 0.25$  до  $\leq 0$ . Следовательно, взаимодействие магнитосферы с межпланетной ударной волной привело к росту энергии частиц ночного плазменного слоя и к увеличению доли электронов с энергией 5 кэВ и малыми питч-углами. Такие электроны могут проникать до высот 106–126 км, где образуются *Esa* и *Esr*-слои, активизация которых отмечена в разделе 4 как одна из особенностей интервала I.

С 14:30 до 17:00 UT давление солнечного ветра почти стабильно ( $P_{sw} \approx 7.5$  нПа),  $T_{\parallel i}$ , в среднем, оставалась на уровне  $\sim 12$  кэВ, а  $T_{\parallel e}$  немонотонно снижалась до 2 кэВ. Температурное распределение частиц по-прежнему почти изотропно. Дальнейшее увеличение  $P_{sw}$  до 15 нПа, сменившееся в 22:30 UT немонотонным спадом, сопровождалось уменьшением  $T_{\parallel i}$  и  $T_{\parallel e}$ , увеличением плотности горячих ионов и электронов и переходом от изотропного к поперечно-анизотропному ( $K_{ai} \sim 0.5$  и  $K_{ae} \sim 0.25$ ) температурному распределению, сохранившемуся до конца интервала II. В 20:00–23:30 UT (05:30–08:00 MLT) холодная плазма двигалась к Земле.

В интервале II спутник проходил сектор 08:00–13:30 MLT. В 08:30–10:30 MLT температура снизилась до характерных для магнитослоя значений  $T_i \leq 1$  кэВ и  $T_e \leq 0.1$  кэВ, плотность горячих частиц увеличилась до 15–40 см<sup>-3</sup>. Эти изменения показали, что дневная магнитопауза, находившаяся под действием сжатого солнечного ветра, сместилась в это время до орбиты L7, а ее ионосферная проекция до  $\phi' = 63.9^\circ$ . Скорость холодных ионов  $V_z \approx 0$ .

Расширение дневной магнитосферы за геостационарную орбиту, происходившее при снижении  $P_{sw}$  до 3 нПа, проявилось в данных L7 как резкий рост температур до  $T_i \approx 7$  кэВ и  $T_e \approx 2.5$  кэВ, переход от  $V_z \approx 0$  к  $V_z < 0$  и уменьшение  $N_i$ ,  $N_e$  до 1 см<sup>-3</sup>. Сразу после уменьшения плотности горячих ионов, плотность холодных ионов увеличилась от 1 до 8 см<sup>-3</sup>. В работе [Нишида, 1980] область высокой плотности холодных ионов, аналогичная зарегистрированной спутником L7 в секторе 10:30–13:30 MLT, названа плазменным хвостом. По существующим представлениям такая плазменная



**Рис. 4.** (а) – Средние 15-минутные значения  $P_{sw}$  и  $E_s$ , определенные по данным спутника ACE. Построенные по данным L7 средние 15-минутные вариации: (б) – плотности электронов ( $N_e$ , канал 0.03–45 кэВ), холодных ( $N_i$ , 0.13–45 кэВ) и горячих ( $N_j$ , 0.13–45 кэВ) ионов; (в) – радиальной скорости ионов ( $V_z > 0$  в направлении к центру Земли); (г) – продольной температуры ( $T_{ji}$ ,  $T_{je}$ ) ионов и электронов; (д, е) – величины  $K_a = T_{\perp}/T_{\parallel} - 1$ , характеризующей степень анизотропии температур ионов и электронов ( $T_{\perp}$  – поперечная температура).

структура образуется частицами плазмосферы, дрейфующими к периферии магнитосферы под действием поля магнитосферной конвекции. Воспользовавшись формулами таблицы 2.1 работы [Лайонс и Уильямс, 1987] получаем при  $L = 6.6$  и средней скорости  $V_z = -20$  км/с, что в плазменном хвосте направленное на восток зональное поле  $E_c = 2.2$  мВ/м, т.е. в 1.5 раза больше текущего значения  $E_c$ , показанного на рис. 2 г.

В интервале III (сектор 13:30–16:45 MLT) температура частиц меньше добуревой, температурное распределение ионов/электронов продольно/поперечно-анизотропно ( $K_{ai} \sim -0.25$ ,  $K_{ae} \sim 0.2$ ), плотность ( $N_i \sim 0.8$  см<sup>-3</sup>,  $N_e \sim 1.2$  см<sup>-3</sup>) в 1.6–2.4 раза выше добуревой. Скорость движения холодной плазмы отрицательна. Характер изменения температур, плотности и анизотропии горячих частиц с 14 UT 14.12.2006 г. до 01 UT 15.12.2006 г. показывает, что в послеполуночные часы спутник пересек область максимума давления ночного плазменного слоя, вышел вблизи 05 MLT в пограничный слой, затем в секторе 08:30–10:30 MLT — в магнитослой. После 01 UT 15.12 спутник вернулся в высокоширотную магнитосферу, где последовательно зарегистрировал плазменный хвост и, около 13:30 MLT (04 UT), плазменный слой, плотность которого по данным L7 увеличилась в 1.6–2.4 раза после начала магнитной бури.

С точки зрения генерации ионосферных возмущений наиболее важно следующее.

— Перед магнитной бурей граница ночного плазменного слоя находилась внутри геостационарной орбиты. Ударная волна и переходная область вспышечной неоднородности вызвали рост энергии, уменьшение питч-углов и смещение частиц плазменного слоя к Земле.

— Холодная плазма дневной магнитосферы в секторе ионосферных измерений смещалась к Земле в области сжатого солнечного ветра и от Земли в области собственно вспышечного потока. Широта ионосферной проекции магнитопаузы была минимальна ( $\varphi' \leq 64^\circ$ ) во время изменения направления радиального дрейфа, зафиксированного вблизи 10 MLT.

— В полуденном секторе (10:30–13:30 MLT) на геостационарной орбите существовала ограниченная по долготе область высокой плотности холодной плазмы (плазменный хвост).

## 6. ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 5 показаны средние пятнадцатиминутные вариации модуля возмущения  $H$ -составляющей геомагнитного поля ( $\Delta H$ ) и его склонения ( $D$ ) вблизи геомагнитного меридиана спутника L7 (обсерватории Чокурдах, Зырянка, Магадан) и запад-

нее него (Тикси, Якутск). Значения  $\Delta H$  и  $D$  вычислены по отклонениям  $X$ ,  $Y$ -компонент геомагнитного поля от уровня, определенного по 5-ти спокойным дням декабря 2006 г. Величина  $|D| < 90^\circ$  ( $|D| > 90^\circ$ ) соответствует восточному (западному) электроджету. Во втором ряду на левой панели изменения  $\Delta H$  в Чокурдах, сопоставлены с вариациями  $E_c$ , рассчитанной по скорости солнечного ветра и  $V_y$ ,  $V_z$ -компонентам ММП. На правой панели вариации  $\Delta H$  в Тикси сопоставлены с величинами  $E_c$ , определенными по радиальной скорости солнечного ветра  $V_x$  и  $V_z$ -компоненте ММП [Нишида, 1980]. На нижней левой панели показана широта  $\varphi'$  центра западного и восточного электроджетов. Она определена линейной интерполяцией значений  $\Delta Z$  (отклонений  $Z$ -компоненты геомагнитного поля от спокойного уровня) на обсерваториях Чокурдах и Зырянка. Значения  $\varphi'$  соответствуют широте, где  $\Delta Z = 0$ , и вычислены для моментов, когда обе обсерватории находились в секторе развития западного/восточного электроджета и регистрировали разные по знаку  $\Delta Z$ .

Как видно на рис. 5, вариации магнитосферного поля конвекции содержат две компоненты — длиннопериодную ( $T \sim 7-8$  ч) и короткопериодную ( $T \leq 1$  ч). До 04 UT 15.12.2006 г. медленные изменения  $E_c$  сопровождаются изменениями среднего уровня геомагнитной активности на всех обсерваториях. Два основных максимума  $\Delta H$ , зарегистрированные всеми станциями в 17:30 UT 14.12 и в 00 UT 15.12, совпадают по времени с двумя основными максимумами  $E_c(t)$ , как показано на левой панели. По данным обс. Чокурдах среднее значение  $\Delta H/E_c$  ( $400 \pm 130$  нТл м/мВ) максимально на фазе немонотонного роста  $E_c$  в 14–18 UT 14.12.2006 г. и минимально ( $\Delta H/E_c \approx 100 \pm 65$  нТл м/мВ) во время спада  $E_c$  в 00–04 UT 15.12.2006 г. Это различие обусловлено повышенной/пониженной проводимостью ионосферы в периоды развития положительного/отрицательного возмущения.

Длиннопериодные эффекты усиления и ослабления поля западного электроджета, зарегистрированные якутскими станциями в 14:00–01:30 UT 14–15.12.2006 г., глобальны. На рис. 2е они проявляются в соответствующих изменениях  $AL$ -индекса. После 01:30 UT 15.12 изменения  $\Delta H$  на рассматриваемых обсерваториях не совпадают между собой и заметно отличаются от вариаций  $AU$  и  $AL$ -индексов. Например, в 01:30–04:00 UT индексы  $AL/AU$  понижаются до  $-1600/-100$  нТл, а вариации  $\Delta H$  на якутских станциях, регистрирующих поле западного электроджета с  $|D| > 90^\circ$ , меньше 200 нТл. Максимум  $\Delta H$ , равный 300 нТл, зарегистрирован обс. Зырянка, находящейся в поле восточного электроджета с  $D \approx 0^\circ$ . В этом интервале в Якутске наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение, а на спутнике L7 — направленные от

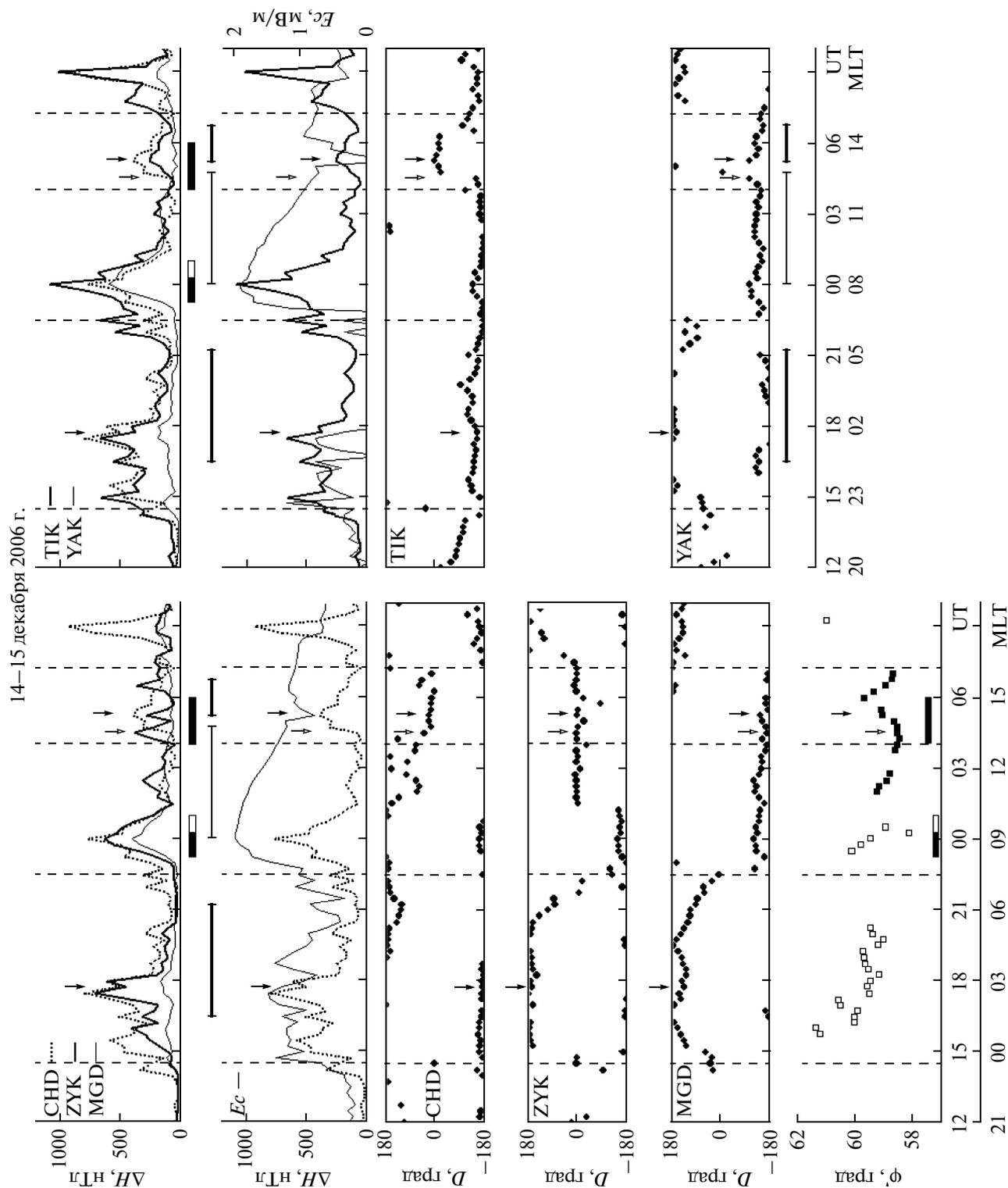


Рис. 5. Вариации модуля возмущения горизонтальной составляющей геомагнитного поля ( $\Delta H$ , линии), склонения вектора  $\Delta H$  ( $D$ , точки) и широты  $\phi$  центра западного/восточного (светлые/темные квадраты) электроджета. Значения  $\phi$  соответствуют широте, на которой возмущение вертикальной компоненты магнитного поля  $\Delta Z = 0$ .

Земли потоки холодной плазмы. На obs. Чокурдах, самой близкой к спутнику L7, преобладали слабые возмущения с  $\Delta H \leq 100$  нТл и склонением  $D$ , меняющимся от  $45^\circ$  до  $170^\circ$ . Согласно работе [Strangeway et al., 2000], такие геомагнитные возмущения наблюдаются под ионосферной проекцией каспа при положительной  $B_y$ -компоненте ММП. Следовательно, отрицательное ионосферное возмущение в Якутске развивалось между утренним и вечерним вихрями магнитосферной конвекции в секторе смещения дневной магнитопаузы до широты obs. Чокурдах ( $\phi' \sim 62^\circ$ ). Второе утверждение соответствует выводу, сделанному при анализе данных спутника L7 в разделе 5.

Наиболее ярко нарушение связи между изменениями  $\Delta H$  и  $E_s$  проявилось в III интервале, когда обсерватории Чокурдах, Зырянка и Тикси зарегистрировали синхронное усиление поля восточного электроджета, а Якутск, Жиганск и Магадан — положительное ионосферное возмущение. Рост  $\Delta H$  совпадает по времени с резким ослаблением поля  $E_s$  при кратковременной переориентации  $B_z$ -компоненты ММП и с бухтообразным увеличением  $AU$ -индекса (рис. 2), значения которого соответствуют вариациям  $\Delta H$  в Тикси. Это показывает, что в интервале III якутские ионосферные станции находились в секторе максимальной интенсивности восточного электроджета.

Выделим отдельные, наиболее важные для изучения причин генерации ионосферных возмущений, детали пространственно-временной связи между короткопериодными вариациями  $\Delta H$  на разнесенных станциях и вариациями поля конвекции. На рис. 5 видно, что  $\Delta H$  увеличилось сразу после SSC. Первые максимумы  $\Delta H$  зарегистрированы в 14:15 UT на станциях Чокурдах и Тикси, через 15 мин — в Зырянке, и, наконец, в 14:45 UT в Магадане и Якутске. Мы полагаем, что возмущения  $\Delta H$  вызваны в этом случае суперпозицией трех процессов: сжатием геомагнитного поля на фазе роста  $P_{sw}$ , усилением западного электроджета и смещением его в сторону экватора. Преобладание эффекта сжатия проявилось в значениях  $D \sim 0^\circ - 50^\circ$ , а увеличение вклада западного электроджета — в последующем росте  $|D|$  до  $\geq 145^\circ - 180^\circ$  и кратковременном уменьшении  $\Delta H$  на станциях Чокурдах, Зырянка и Тикси. Задержки между временем первого максимума  $\Delta H$  на разнесенных по широте обсерваториях и заметное уменьшение  $\phi'$  показывают, что центр западного джета двигался к экватору, что соответствует смещению магнитосферных источников высыпающихся частиц к Земле, выявленному в части 5.

С 14 до 16 UT 14.12. вариации  $\Delta H$  на разнесенных станциях и  $E_s$  не всегда совпадают, что может быть связано с неоднородностями ионосферной проводимости, созданными высыпающимися частицами при сжатии магнитосферы. В 15–16 UT

экстремумы  $E_s$  совпадают с максимумами и минимумами  $\Delta H$  на станциях Чокурдах и Тикси, в 16–18 UT — на станциях Чокурдах, Тикси и Зырянка. В это время обсерватории находились в поле западного электроджета с центром на  $\phi' \leq 60^\circ$ , и Якутск регистрировал резкое повышение аномальной ночной ионизации в F2-слое и  $E_s$  (см. рис. 3a). Таким образом, описанные в разделе 4.1 ночные спорадические E и F-слои формировались в секторе западного электроджета, интенсивность и широта которого модулировались динамическим давлением солнечного ветра и межпланетным электрическим полем, создающим поле магнитосферной конвекции. При этом быстрые (30–60 мин) вариации межпланетного электрического поля проникали до широты  $\phi' = 57.5^\circ$ .

После 21:30 UT быстрые возмущения западного электроджета, сопровождающие изменения  $E_s$ , наблюдались только на обсерваториях Чокурдах и Тикси. Зырянка, Якутск и Магадан зафиксировали лишь длиннопериодную часть  $\Delta H$ , начавшуюся после 23 UT. Это показывает, что в интервале 21:30–01:30 UT 14–15.12. предшествующем и частично совпадающем с отрицательным ионосферным возмущением в Якутске, влияние быстрых вариаций межпланетного электрического поля и сопровождающих их флуктуаций  $P_{sw}$  (рис. 4) на высыпания частиц ограничено  $\phi' \sim 62^\circ$ .

Соответствие вариаций  $\Delta H$  на разнесенных станциях и их связь с изменениями  $E_s$  нарушились после 01:30 UT. С этого момента изменения  $\Delta H$  не совпадали между собой и значительно отличались от вариаций  $E_s$ . На ст. Чокурдах преобладало поле слабых юго-восточных и юго-западных токов. Обсерватории Зырянка и Тикси регистрировали поля восточного ( $\Delta H \sim 50 - 350$  нТл,  $D \sim 0^\circ$ ) и западного ( $\Delta H \sim 50 - 200$  нТл,  $D \sim -180^\circ$ ) электроджетов, соответственно. Следовательно, смена знака ионосферного возмущения в Магадане и отрицательное возмущение в Якутске развивались в секторе трех отчетливо разделенных в пространстве токовых структур. Это западный/восточный электроджеты, зарегистрированные на широтах  $57.5^\circ/61.8^\circ$  и долготах  $211^\circ/194^\circ$  и токи каспа, зарегистрированные в  $4 - 5^\circ$  к северу от восточного электроджета.

Судя по значениям  $\Delta H$  и  $\Delta \phi'$ , первое аномально высокое дневное значение  $f_oF2$ , зарегистрированное в 04:15 UT в Жиганске, соответствует локальному усилению восточного электроджета вблизи Зырянки, близкой по широте к Жиганску. Максимум  $f_oF2$  в Магадане в 04:30 UT зафиксирован во время максимума активности восточного электроджета в Зырянке и перехода obs. Чокурдах из области переменных по направлению авроральных электроджетов в область устойчивого восточного электроджета. В данных L7 эти события соответствуют выходу спутника из области плазменного хвоста в область

дневного плазменного слоя. Максимальное дневное значение  $foF2$  в Якутске совпадает с максимумом интенсивности восточного электроджета, отмеченным одновременно всеми магнитными обсерваториями.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ

Обсудим в хронологическом порядке возможные причины генерации магнитосферно-ионосферных возмущений, представленных в 4–6 частях статьи.

1. При анализе возмущений начальной фазы бури было установлено, что воздействие на магнитосферу области сжатого солнечного ветра и усиленного межпланетного электрического поля вызвало рост температуры, уменьшение питч-углов частиц ночного плазменного слоя и продвижение его в сторону Земли. Эти изменения сопровождалась генерацией ночных спорадических  $E$  и  $F2$ -слоев в Якутске и Жиганске, а также усилением и экваториальным смещением западного электроджета. Критическая частота  $F2$ -слоя в Якутске достигла максимума при минимальной широте центра джета ( $\varphi' \sim 59.5^\circ$ ) через 15 мин после максимума  $\Delta H$ , зарегистрированного всеми рассматриваемыми обсерваториями. Сходство тенденций развития и синхронность ионосферных и геомагнитных возмущений, замеченное в ночном секторе, показывает, что общей причиной их активизации могли быть указанные выше изменения плазменного слоя, вызвавшие усиление авроральных высыпаний и смещение их в сторону экватора на фазе роста  $Psw$  и  $Ec$ .

2. Эффект сжатия магнитосферы во время SSC был зарегистрирован одновременно всеми геостационарными спутниками. На спутниках серии LANL он проявился в резком увеличении температуры частиц, на спутниках GOES 11/12 – в отчетливом увеличении модуля магнитного поля. В отличие от него, признаки смещения магнитопаузы до геостационарной орбиты наблюдались только в дневной магнитосфере. Они возникли при квазипериодических понижениях  $Bz$ -компоненты ММП до  $-10$  нТл и флуктуациях  $Psw$  в пределах  $14 \pm 6$  нПа. На спутниках L4 и L9 были зарегистрированы изменения температуры и плотности, подобные наблюдавшимся на L7, а на спутнике G11 – значения  $Bz < -50$  нТл. Указанные изменения начались и закончились в секторе 11:30–14:00 MLT на час раньше, чем на L7.

Из-за ограниченности экспериментальных данных мы не можем точно указать, что именно (поверхностные волны, пересоединение или относительно устойчивая по сравнению с этими кратковременными явлениями деформация магнитопаузы) является причиной проникновения частиц и полей магнитослоя на геостационарную орбиту [Нишида,

1980; Greenwald et al., 1999; Haerendel et al., 1978]. Тем не менее, вся совокупность экспериментальных данных, в том числе отмеченное в части 6 нарушение связи между короткопериодными возмущениями магнитного поля на разнесенных станциях, показывает, что дневное отрицательное ионосферное возмущение началось в том долготном секторе, где дневная магнитопауза находилась вблизи геостационарной орбиты. Понижение ионизации  $F2$ -слоя достигло максимума восточнее этого долготного сектора в области плотной холодной плазмы, дрейфующей к периферии магнитосферы из-за локального усиления зонального поля конвекции (рассмотрено в ч. 5). Исходя из общности топологии ионосферного и магнитосферного поля конвекции, мы полагаем, что в данном случае аномальное понижение  $foF2$  было вызвано выносом ионосферной плазмы в высокие широты.

3. Продолжавшееся более 10-ти часов взаимодействие магнитосферы Земли с плотным солнечным ветром привело к росту плотности частиц плазменного слоя. По данным спутника A1, плотность частиц в ночном плазменном слое изменилась от  $Ni \approx Ne \approx 0.6 \text{ см}^{-3}$  в 21:30–04:00 UT 13–14.12.2006 г. до  $Ni = 1.2$  и  $Ne = 1.9 \text{ см}^{-3}$  в эти же часы 14–15.12.2006 г., т.е. выросла за сутки в 2–3 раза. Из-за сильной деформации дневной магнитосферы, описанной в разделе 5, мы не можем оценить плотность дневного плазменного слоя непосредственно по данным геостационарных спутников. Тем не менее, основываясь на модельных расчетах дрейфовых траекторий частиц плазменного слоя (см., например, [Нишида, 1980]), можно предположить, что 15.12.2006 г. его плотность была в 2–3 раза выше, чем в предшествующие сутки. Таким образом, 15.12.2006 г. большие значения  $foF2$ , превышающие в 1.5–1.7 раза спокойный послеполуденный уровень, могли быть зафиксированы станциями Жиганск, Якутск и Магадан при пересечении ими в процессе суточного вращения Земли резкой западной границы плотного дневного плазменного слоя.

## ВЫВОДЫ

В 4–6 частях статьи мы рассмотрели наиболее значительные возмущения околоземной плазмы и геомагнитного поля, зарегистрированные 14–15.12.2006 г. в узком долготном секторе ( $\lambda' \sim 190^\circ$ – $213^\circ$ ) на широтах  $\varphi' \sim 52^\circ$ – $62^\circ$  во время взаимодействия магнитосферы Земли с межпланетной вспышечной неоднородностью, установили пространственно-временные соотношения между ними и условиями на границе магнитосферы. Проведенный анализ показал, что

1. Высокоширотные ночные спорадические  $E$  и  $F2$ -слои (положительное ионосферное возмущение) возникли в начальную фазу магнитной бури

при взаимодействии магнитосферы с переходной областью вспышечного потока. Основными причинами их генерации были активизация высыпаний и смещение дрейфовых траекторий частиц плазменного слоя к Земле вследствие сжатия магнитосферы и усиления поля крупномасштабной магнитосферной конвекции.

2. Дневное уменьшение электронной плотности  $F_2$ -слоя в Якутске (отрицательное ионосферное возмущение) и сопровождавшее его полное поглощение на ст. Жиганск развивались в главную фазу бури в области плазменного хвоста. Эти явления могут быть причинно связаны с локальным усилением зонального электрического поля, вызвавшим в секторе проведения измерений вынос плазмы за пределы дневной магнитосферы и изменение ее ионного состава.

3. Высокие значения критической частоты  $F_2$ -слоя были зарегистрированы после перехода наблюдательных пунктов из области плазменного хвоста в сектор восточного электроджета (вечернего вихря крупномасштабной конвекции). Резкий рост  $foF_2$  и стабилизация направления вектора возмущения геомагнитного поля указывают на резкую границу раздела между этими плазменными структурами.

4. Аномально высокие значения  $foF_2$ , зафиксированные станциями вблизи западного края вечернего вихря конвекции, объясняются высокой плотностью частиц плазменного слоя, сформировавшегося в условиях продолжительного взаимодействия магнитосферы Земли с плотным солнечным ветром.

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего исследования влияния сжатого солнечного ветра на структуру высокоширотной ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00908).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В., Смольков Г.Я., Ишин А.Б. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS — ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 146–157. 2009.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 4. С. 467–473. 2005.
- Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. М.: Мир. 312 с. 1987.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 299 с. 1980.
- Шестопалов И.П., Харин Е.П. Некоторые особенности характера вариаций заряженных частиц и нейтронов во вспышке 13 декабря 2006 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. С. 22–24. 2008.
- Abbasi R., Ackermann M., Adams J. et al. Solar energetic particle spectrum on 2006 December 13 determined by IceTop // *Astrophys. J.* V. 689: L65–L68. 2008.
- Doyle M.A., Burke W.J. S3-2 measurements of polar cap potential // *J. Geophys. Res.* V. 88. № 11. P. 9125–9133. 1983.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms // *J. Atmosph. Terr. Phys.* V. 64. P. 173–181. 2002.
- Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Baker K.B., Bristow W.A., Sofko G.J., Villain J.P., Lester M., Slavin J. Convective response to a transient increase in dayside reconnection // *J. Geophys. Res.* V. 104. №. 5. P. 10007–10015. 1999.
- Haerendel G., Paschmann G., Schopke N., Rosenbauer H., Hedgcock P.C. The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection // *J. Geophys. Res.* V. 83. № 7. P. 3195–3216. 1978.
- Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., Mikhalev A.V., Poddelsky I.N., Stepanov A.E. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north eastern region of Asia during the minimum of 23-th cycle of solar activity // *J. Atmosph. Solar-Terrest. Phys.* V. 70. P. 2346–2357. 2008.
- Lei J., Wang W., Burns A.G., Solomon S.C., Richmond A.D., Wiltberger M., Goncharenko L.P., Coster A., Reinisch B.W. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase // *J. Geophys. Res.* V. 113. A01314, doi:10.1029/2007JA012807. 2008a.
- Lei J., Burns A.G., Tsugava T., Wang W., Solomon S.C., Wiltberger M. Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 113. A06310, doi:10.1029/2008JA013090. 2008b.
- Ma S.Y., Cai H.T., Liu H.X., Schlegel K., Lu G. Positive storm effects in the dayside polar ionospheric F-region observed by EISCAT and ESR during the magnetic storm of 15 May 1997 // *Ann. Geophysicae.* V. 20. P. 1377–1384. 2002.
- McKenna-Lawlor S.M.P., Dryer M., Fry C.D. et al. Predicting Interplanetary shock arrivals at Earth, Mars, and Venus: a real-time modeling experiment following the solar flares of 5–14 December 2006 // *J. Geophys. Res.* V. 113. A06101, doi:10.1029/2007JA012577. 2008.
- Pudovkin M.I., Zaitseva S.A., Benevolenska E.E. The structure and parameters of flare streams // *J. Geophys. Res.* V. 84. № 11. P. 6649–6652. 1979.
- Strangeway R.J., Russell C.T., Carlson C.W., McFadden J.P., Ergun R.E., Temerin M., Klumpar D.M., Peterson W.K., Moore T.E. Cusp field-aligned currents and ion outflows // *J. Geophys. Res.* V. 105. №. 9. P. 21129–21142. 2000.
- Tereshchenko V.D., Vasiljev E.B., Ogloblina O.F., Tereshchenko V.A., Chernyakov S.M. The response of the polar lower ionosphere to powerful solar flares on December, 5–14, 2006 / *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXX Annual Seminar. Apatity.* P. 196–198. 2007.