

УДК 550.520.16+523.31+523.9:520.86

## ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ В ИОНОСФЕРЕ В ТЕЧЕНИЕ МАГНИТОСФЕРНОЙ БУРИ 7–10 НОЯБРЯ 2004 г.

© 2011 г. В. П. Бурмака<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионосферы НАНУ и МОНУ г. Харьков, Украина

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

e-mail: viktor\_burmaka@ukr.net

e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 13.10.2009 г.

После доработки 28.04.2010 г.

Приведены результаты исследования волновых возмущений (ВВ) концентрации электронов  $N$  в ионосфере в период сильнейшей геокосмической бури, в ходе которой концентрация электронов уменьшалась в 6–7 раз, а температуры ионов и электронов в ночное время увеличивались до 2000 и 3000 К соответственно. Проанализированы высотно-временные вариации параметров ВВ. Показано, что геокосмическая буря сопровождалась значительным изменением волновой активности в ионосфере. В период отрицательных ионосферных бурь амплитуда  $\Delta N$  уменьшалась в 2–10 раз, относительная амплитуда  $\delta_N = \Delta N/N$  при этом изменялась незначительно и находилась в пределах 0.05–0.10 в дневное время. В ночное время  $\delta_N$  достигала 0.25–0.30, а иногда и 0.4–0.5. И возмущенные, и в невозмущенные дни преобладали квазипериодические процессы с периодом 40–60 и 80–120 мин. Максимальные значения абсолютных и относительных амплитуд имели место на высоте около 200–270 км.

Обнаружено солитоноподобное возмущение, возникшее вблизи главной фазы магнитной бури 10 ноября. Его появление связано с наклонными когерентными отражениями зондирующих сигналов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные бури, сопровождающиеся геоэффективными выбросами солнечного вещества, вызывают значительные возмущения в геокосмосе, в частности приводят к магнитным и ионосферным бурям. Последние изучаются давно и весьма успешно (см., например, [Акасофу и Чепмен, 1974; 1975]). Обзор результатов исследований проведен, например, в работах [Данилов и Морозова, 1985; Gonzales et al., 1994; Bounanto, 1999]. Установлено, что геоэффективные солнечные бури вызывают целый комплекс физикохимических процессов во всех геосферах (см., например, [Акасофу и Чепмен, 1974, 1975, 2004; 2005; Афраймович и Перевалова, 2006; Данилов и Морозова, 1985; спецвыпуск журнала “Геомагнетизм и аэрономия”, 2005; Bounsanto, 1999; Daglis et al., 2003; Gonzales et al., 1994; Lin et al., 2005]).

Оказалось, что геокосмическая буря (ГБ) представляет собой синергетически взаимодействующую совокупность магнитной, атмосферной, ионосферной и электрической бурь [Черногор, 2003а, б; 2006; 2007; Chernogor and Rozumenko, 2008]. ГБ затрагивает всю систему Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), вызывая перестройку взаимодействия подсистем.

Каждая ГБ наряду с общими закономерностями имеет свои индивидуальные особенности. Значительный интерес представляет исследование экстре-

мальных геокосмических бурь. Примером таких бурь были бури в октябре–ноябре 2003 г. и в ноябре 2004 г.

Событиям в октябре–ноябре 2003 г. посвящено большое количество работ (см., например, [спецвыпуск журнала “Геомагнетизм и аэрономия”, 2005; Lin et al., 2005]).

ГБ 7–10 ноября относится к сильнейшим и в определенном смысле уникальным.

Во-первых, энергетика бури была близка к максимальной. Концентрация электронов уменьшалась до 6–7 раз, а температура ионов и электронов в ночное время увеличивались до 2000 и 3000 К соответственно [Григоренко и др., 2007а,б,в; Панасенко и Черногор, 2007].

Во-вторых, ГБ состояла из двух последовательных бурь, начавшихся 7 и 10 ноября.

В третьих, буря имела место в период спада солнечной активности, достаточно далеко от ее максимума.

ГБ 2004 г. посвящен ряд работ (см., например, [Ермолаев и др., 2005; Григоренко и др., 2007а, б, в; Панасенко и Черногор, 2007]). Достаточно подробно исследованы причины ГБ, особенности магнитной бури, а также вариации регулярных параметров околоземной среды, сопровождавшие ГБ.

В подавляющем числе работ, посвященных геокосмическим бурям, представлены результаты исследования вариаций регулярных параметров сре-

ды. Вариации нерегулярных параметров ионосферы, и в частности волновые возмущения (ВВ), изучались лишь в отдельных работах (см., например, [Афраймович и Перевалова, 2006]). В работе [Панасенко и Черногор, 2007] рассмотрены ВВ на высотах  $D$ -области ионосферы.

Таким образом, неизученными остались пространственно-временные вариации параметров ВВ в  $F$ -области ионосферы, а также во внешней ионосфере в течение ГБ, имевшей место в ноябре 2004 г.

Целью работы является исследование особенностей волновой активности в среднеширотной ионосфере на высотах 125–510 км в период ГБ 7–10 ноября 2004 г.

## 2. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Подробное описание солнечной вспышечной и эруптивной активности в ноябре 2004 г., вызвавшей значительные возмущения в межпланетной среде и в магнитосфере Земли, приведено в работах [Ермолаев и др., 2005; Григоренко и др., 2007а, б, в; Панасенко и Черногор, 2007].

Здесь отметим лишь следующее.

Накануне ГБ площадь солнечных пятен достигала 1400 (в единицах  $10^{-6}$ ), число солнечных пятен – 135–144, число  $F10.7$  – 130–136, число рентгеновских вспышек – 10–15.

7 и 10 ноября имели место интенсивные рентгеновские вспышки классов  $X2.0$  и  $X2.5$  соответственно. Они сопровождалась выбросами корональной массы, которые привели к резкому увеличению инжектируемой у полюсов Земли энергии в ночь с 7 на 8 ноября и с 10 на 11 ноября. Энергетическая функция Акасофу при этом увеличивалась на порядок и более. Примерно в это же время имели место главные фазы двух, следовавших друг за другом, геомагнитных бурь. Минимальные значения  $Dst$ -индекса отмечались около 07:00 (здесь и далее UT) 8 ноября ( $Dst_{\min} \approx -373$  нТл) и в интервале времени 10:00–11:00 10 ноября ( $Dst_{\min} \approx -289$  нТл). При этом максимальные значения индекса  $Kp$  принимали значения 8.7.

Частичная релаксация магнитных бурь наблюдалась в интервалах времени с 07:00 8 ноября примерно до 12:00 9 ноября и с 11:00 10 ноября до конца суток 11 ноября.

## 3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

*Радар некогерентного рассеяния.* Радар расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' N, 36°18' E). Основные параметры радара следующие: частота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны –  $\sim 3700$  м<sup>2</sup>, коэффициент усиления

антенны –  $\sim 10^4$ , ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны –  $\sim 1^\circ$ , импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса  $\tau_p \leq 800$  мкс, частота следования импульсов  $F = 24.4$  Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5–9.5 кГц [Таран, 2001].

*Ионозонд.* Стандартный ионозонд “БАЗИС” предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром НР.

*Методы анализа.* Статистическому анализу подвергались временные зависимости мощности смеси сигнала и шума  $P_{sn}$ , мощности сигнала  $P_s$  и мощности шума  $P_n$ . При этом использовались методики, описанные в работах [Бурмака и др., 2004а,б].

Анализ проведен для временных зависимостей

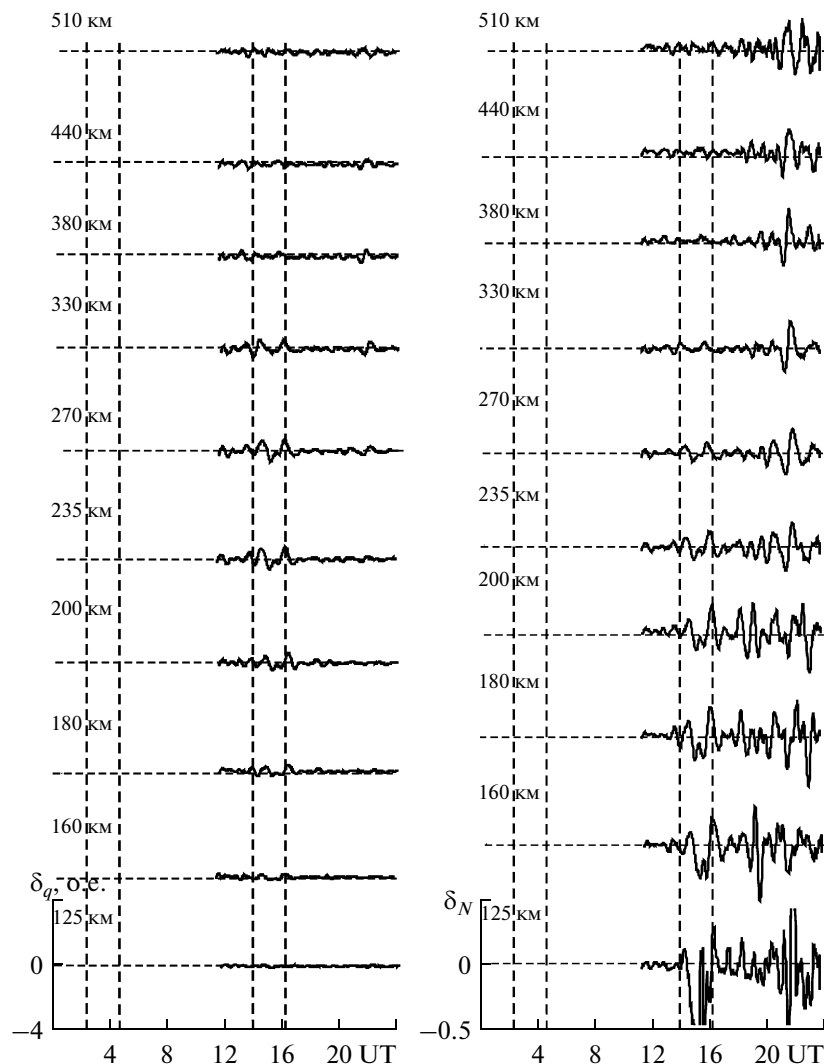
$$\delta_q = k \frac{\delta P_s}{P_n},$$

$$\delta_N = \frac{\delta P_s}{P_s},$$

где  $k = \frac{P_{\max} \tau_p \max}{P \tau_p} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}} \frac{T_{\text{сист}}}{T_{\text{сист max}}}$  (параметры с индексом “max” обозначают максимальные значения для всех измерительных кампаний, без индекса – текущие значения для каждой отдельной измерительной кампании),  $P$  – импульсная мощность радиопередающего устройства,  $P_{\max} = 2.2$  МВт,  $\tau_{p \max} = 800$  мкс,  $\Delta f$  – полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства,  $\Delta f_{\max} = 9.5$  кГц,  $T_{\text{сист}}$  – эффективная шумовая температура системы, приведенная ко входу радиоприемного устройства,  $T_{\text{сист max}} = 1300$ –1800 К в зависимости от времени суток,  $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$ ,  $\bar{P}_s$  и  $\bar{P}_n$  – мощности сигнала и шума соответственно, сглаженные с помощью скользящего среднего на интервале 180 мин. При этом  $\delta_q$  и  $\delta_N$  описывают временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ концентрации электронов. Поскольку  $\delta_q$  измеряется в относительных единицах (о.е.), требовалась их нормировка. В данной измерительной кампании 1 о.е.  $\approx 10^{11}$  м<sup>-3</sup>.

Для оценки периодов и амплитуд ВВ применялись оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП), подробно описанные в работах [Лазоренко и др., 2006; Бурмака и др., 2007; Лазоренко и Черногор, 2009].

При этом используется формат представления результатов анализа, предложенный в указанных работах.



**Рис. 1.** Временные вариации возмущений  $\delta_q$  и относительных возмущений  $\delta_N$  концентрации электронов во время ионосферной бури 8 ноября 2004 г. (вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты восхода и захода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Высотно-временные зависимости абсолютных  $\Delta N$  и относительных  $\delta_N$  вариаций концентрации электронов  $N$  представлены на рисунках 1–5. Видно, что  $\Delta N$  и  $\delta_N$  существенно варьировались в течение суток, от суток к суткам, а также при изменении высоты.

*Временные вариации параметров ВВ.* В результате отрицательной ионосферной бури концентрация электронов в дневное время 8 и 10 ноября почти на всех высотах уменьшалась в 2–6 раз по сравнению с  $N$  9 ноября (табл. 1). Значения  $N$  9 ноября были близки к тем, что наблюдались в фоновые дни (с 28 по 30 октября 2004 г.). 11 и 12 ноября концентрация электронов все еще восстанавливалась после ионосферной бури 10 ноября. Примерно во столько же

раз уменьшалась абсолютная амплитуда  $\Delta N_m$  ВВ (см. табл. 1). Значения относительных амплитуд ВВ  $\delta_{N_m}$  в дни ионосферных бурь и в контрольные дни отличались незначительно. Они, как правило, изменялись в пределах 0.05–0.10 (см. табл. 1).

В ночное время влияние ионосферных бурь было выражено слабее. Концентрация электронов уменьшалась только в диапазоне высот 125–350 км и не более, чем в 2–3 раза в ночь с 8 на 9 ноября, а в ночь с 10 на 11 ноября – 1.4–2 раза на высотах  $z \leq 200$ –250 км (табл. 2). После первой ионосферной бури на указанных высотах значения  $\Delta N_m$  уменьшались в 2–10 раз, а после второй бури – в 1.4–4 раза (см. табл. 2).

Значения  $\delta_{N_m}$  слабо зависели от степени возмущенности ионосферы и изменялись от ночи к ночи

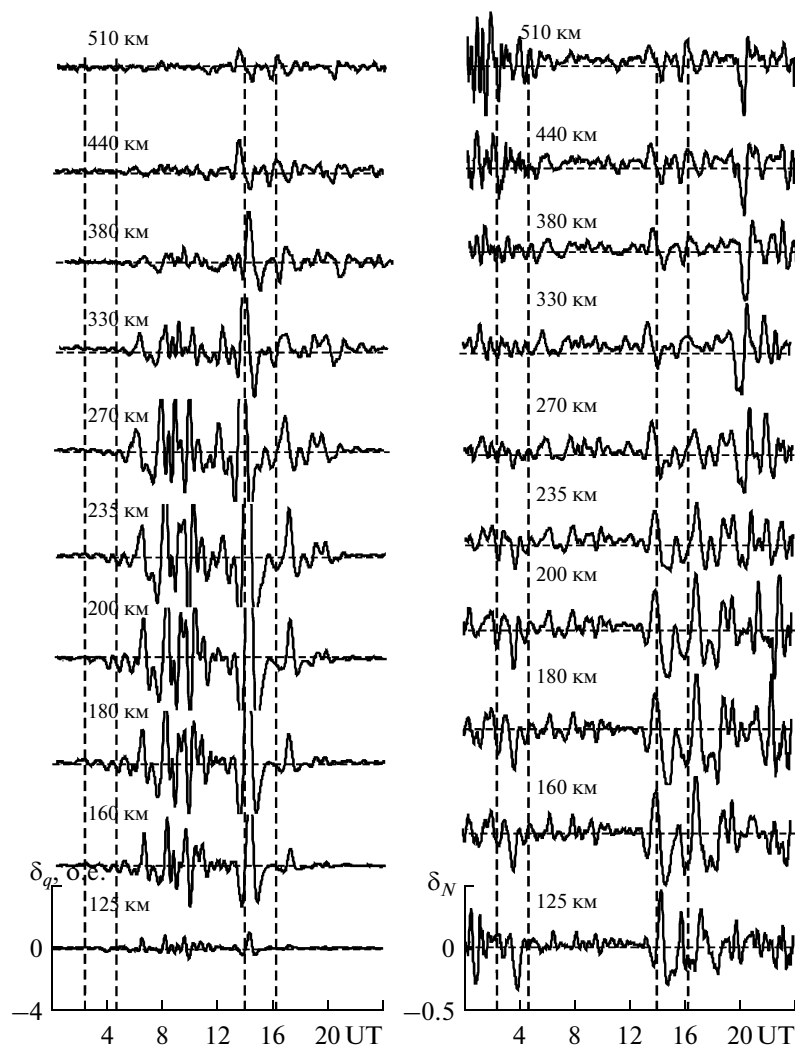


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 9 ноября 2004 г.

слабо: обычно в пределах 0.10–0.20, но в ряде случаев достигали 0.25–0.30 (см. табл. 2).

**Высотные вариации параметров ВВ.** Анализ рис. 1–5 и таблиц 1, 2 позволил установить следующее. В дневное время значения  $\Delta N_m$  увеличивались в 2–7 раз при увеличении высоты от 125 до 200–270 км, а затем постепенно уменьшались до значений в 1–5 раз меньших на высоте 510 км, чем на высоте 125 км.

Значения относительной амплитуды  $\delta_{N_m}$  также увеличивались в 1.2–2 раза в диапазоне высот от 125 до 200 км. На больших высотах обычно  $\delta_{N_m} \approx 0.05$ –0.10.

В день первой ионосферной бури (8 ноября) значения  $\delta_{N_m}$  были в 2–3 меньше, чем 9 ноября (ср. рис. 1 и рис. 2).

В ночное время амплитуда  $\Delta N_m$  увеличивалась в 2–5 раз при увеличении высоты от 125 до 200–

270 км, а затем уменьшалась примерно до тех же значений на высоте 510 км, что и на высоте 125 км.

Относительная амплитуда  $\delta_{N_m}$  принимала значения 0.2–0.3 на высоте 125 км, а затем постепенно уменьшалась при увеличении высоты до 200–270 км до значений 0.1–0.2 и оставалась на таком же уровне на больших высотах (вплоть до 510 км).

В ночь с 8 на 9 ноября почти на всех высотах значения  $\delta_{N_m}$  были несколько больше, чем другие ночи. По-видимому, это было связано с меньшими значениями  $N$  ночью с 8 на 9 ноября.

**Солитоноподобное возмущение.** 10 ноября примерно в интервале времени 10:30–13:00 на высотах (точнее, в диапазоне дальностей  $R$ ) 230–1000 км наблюдался квазипериодический процесс, состоящий из 1.5–2.5 периодов (рис. 6). Его длительность была около 100–140 мин, средний период — 50–55 мин, амплитуда  $P_{30}$  немонотонно изменялась при увели-

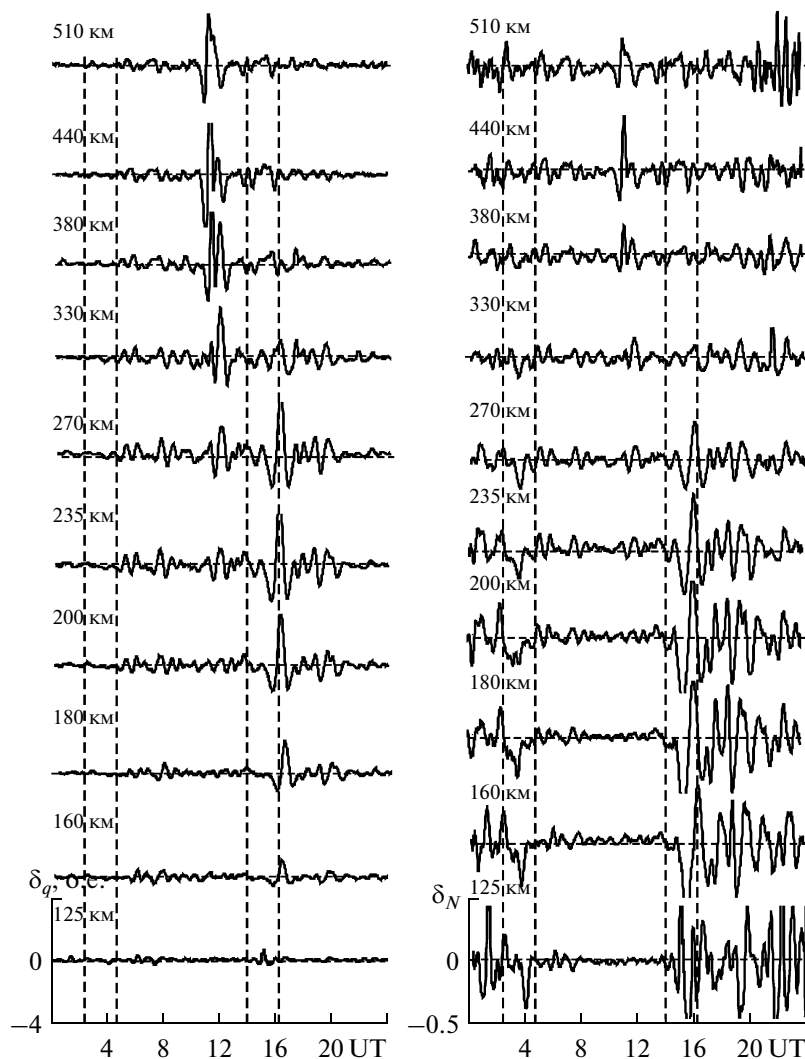


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 10 ноября 2004 г.

чений высоты от 230 до 1000 км, значение  $\delta P_{s0}/\bar{P}_s$  при этом изменялось от 0.2 до 1.4. В зависимости  $\delta P_s$  от  $R$  имели место два максимума — при дальностях около 440 и 710 км.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Приведем результаты спектрального анализа временных вариаций  $\delta_N(t)$ , к примеру, на высоте 200 км.

8 ноября в течение прохождения вечернего терминатора имело место усиление ВВ с периодами около 60 и 100 мин, а в интервалах времени 18:00–20:00 и 21:00–24:00 — 40–70 мин и 40–120 мин соответственно (рис. 7). Амплитуда колебаний не превышала 0.2.

Прохождение утреннего и вечернего терминаторов 9 ноября сопровождалось усилением колебаний с периодами 60–80 мин и 80–120 мин соответствен-

но (рис. 8). После захода Солнца на Земле также отчетливо наблюдался широкополосный процесс с  $T \approx 120$ –180 мин и амплитудой около 0.4. В ночное время имели место ВВ с периодами 45–55 и 80–100 мин.

10 ноября перед прохождением утреннего терминатора преобладал процесс с  $T \approx 80$ –100 мин, затем ему на смену пришел процесс с  $T \approx 130$ –180 мин (рис. 9). В дневное время амплитуда  $\delta_N$  была меньше в 2–3 раза, чем утром, а  $T \approx 40$ –50 мин. Максимальные значения  $\delta_N$  имели место в течение захода Солнца. При этом  $\delta_N \approx 0.5$ , а  $T \approx 60$ –120 мин. В ночное время преобладали колебания с периодами 40–60 и 70–90 мин. Их амплитуда составляла 0.2–0.3.

11 и 12 ноября были хорошо выражены волновые процессы перед наступлением утреннего терминатора и при его прохождении (рис. 10, 11). При этом  $\delta_N \approx 0.10$ –0.15, а периоды равнялись 60–90 и 140–

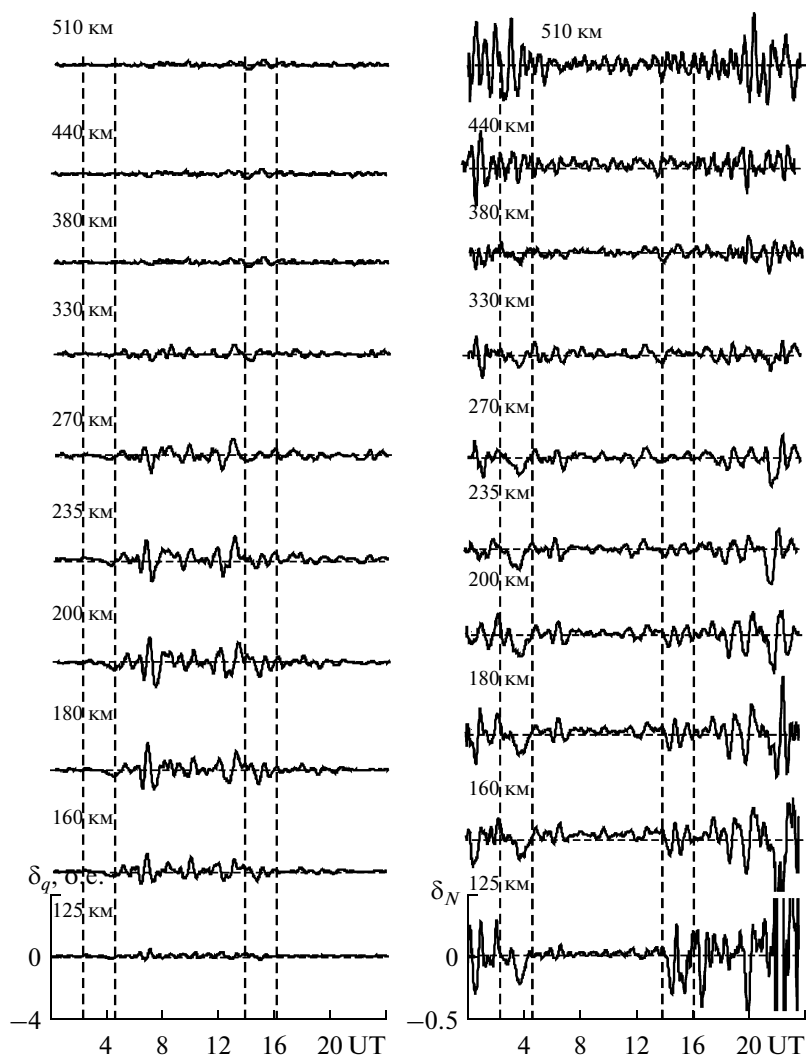


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для 11 ноября 2004 г.

180 мин соответственно. В течение прохождения вечернего терминатора  $\delta_N \approx 0.10$ ,  $T \approx 40\text{--}60$  мин. В ночное время амплитуда ВВ была наибольшей и достигала 0.2–0.3, а периоды преобладающих колебаний составляли 50–70 мин.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

*Пространственно-временные зависимости параметров ВВ.* Проведенные исследования подтвердили ожидаемую закономерность, связанную с тем, что сильнейшая ионосферная буря должна наложить отпечаток на волновую активность в ионосфере. Временные вариации  $\Delta N(t)$  в основном повторяли изменения  $N(t)$ . При уменьшении  $N$  в 2–6 раз в периоды отрицательных ионосферных бурь значения амплитуды  $\Delta N_m$  уменьшались в 2–10 раз. Относительные амплитуды  $\delta_N$  при этом изменялись не-

значительно. Эти результаты согласуются с результатами наших наблюдений, выполненных на одном и том же радаре в периоды других ионосферных бурь [Бурмака и др., 2005а, б; 2006а, б; Бурмака и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2003; 2005; 2007а, б, в; Chernogor et al., 2007].

Интересно, что магнитная и ионосферная бури 7 ноября были сильнее, чем 10 ноября. Продолжительность их была около одних и трех суток соответственно. Синхронно с уменьшением  $N$  уменьшались и вариации  $\Delta N$ .

Высотные зависимости  $\Delta N_m$  и  $\delta_{N_m}$  в основном были такими же, как и в невозмущенных условиях — максимальные значения амплитуд наблюдались в диапазоне высот 200–270 км.

Ночные значения  $\delta_{N_m}$  в среднем в 2–3 раза превышали дневные значения. Качественное поведе-

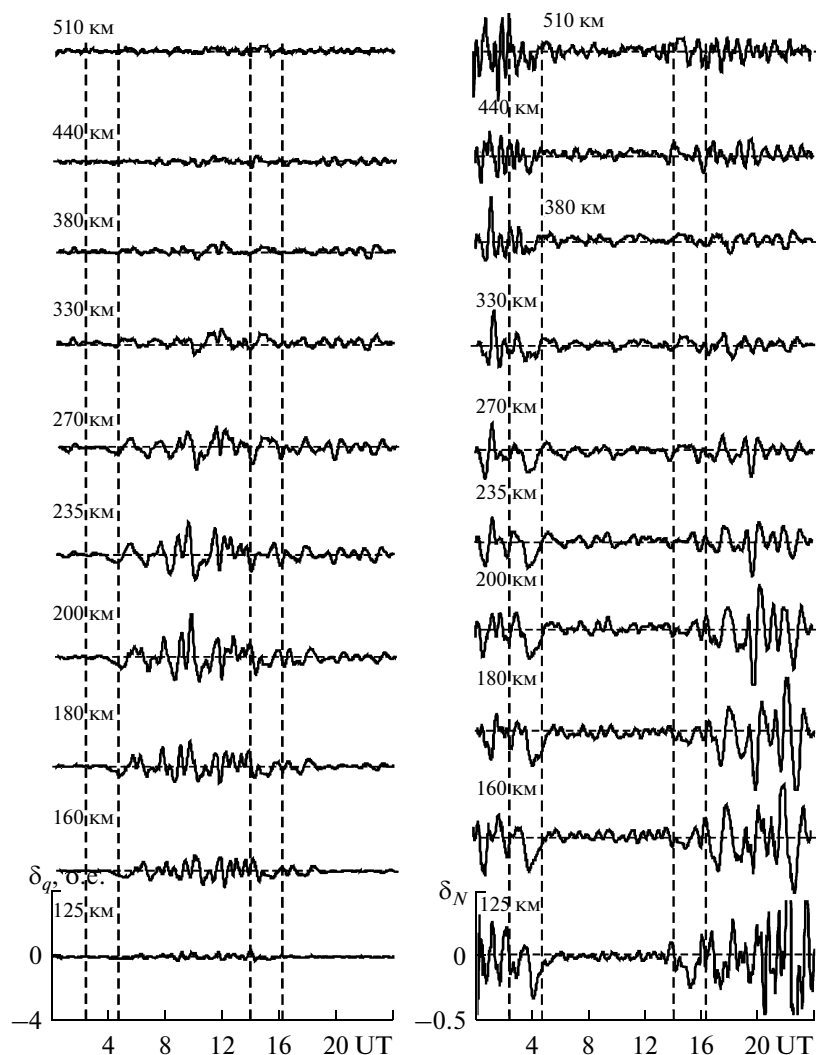


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для 12 ноября 2004 г.

ние временных вариаций  $\Delta N(t)$  и  $\delta_N(t)$  было подобным. Эти результаты также согласуются с данными [Бурмака и др., 2005а, б; 2006а, б; Бурмака и Черногор, 2008].

**Периоды ВВ.** Совместное применение ОПФ, АПФ и ВП позволили локализовать и определить периоды  $T$  преобладающих колебаний. Чаще всего периоды составляли 40–60 и 80–120 мин. Значения  $T$  почти не зависели от степени возмущенности ионосферы. Спектральный состав ВВ существенно изменялся в течение прохождения солнечного терминатора и после этого. Амплитуда колебаний при этом обычно увеличивалась в 1.5–2 раза и достигала 0.3–0.5.

**Солитоноподобное возмущение.** Оно состояло из 1.5–2.5 колебаний, а значит, представляло собой сверхширокополосный процесс. Периоды послед-

него изменялись от  $T_{\min}$  до  $T_{\max}$ . Последние можно оценить из следующих соотношений:

$$T_{\min} = T \left(1 - \frac{\mu}{2}\right),$$

$$T_{\max} = T \left(1 + \frac{\mu}{2}\right),$$

Здесь  $T = 50$ – $55$  мин – среднее значение периода,  $\mu$  – показатель широкополосности. [Астанин и Костылев, 1989; Лазоренко, Черногор, 2009],

$$\mu \approx \frac{4}{n},$$

где  $n$  – число временных лепестков. При  $n = 4$ – $5$  имеем  $\mu = 0.8$ – $1$ . Полагая, что в среднем  $\mu = 0.9$ ,  $T = 50$ – $55$  мин, получим, что  $T_{\min} \approx 28$ – $30$  мин,  $T_{\max} \approx 78$ – $85$  мин.

**Таблица 1.** Концентрация электронов  $N$ , абсолютная  $\Delta N_m$  и относительная  $\delta_{Nm}$  амплитуды ВВ для дневного времени

Высота	Параметр	Дата				
		8 ноября	9 ноября	10 ноября	11 ноября	12 ноября
125 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$1.6 \times 10^{11}$	$3.1 \times 10^{11}$	$1.8 \times 10^{11}$	$2.8 \times 10^{11}$	$2.8 \times 10^{11}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$0.5 \times 10^{10}$	$(1-2) \times 10^{10}$	$(0.7-1.4) \times 10^{10}$	$(1.1-2.2) \times 10^{10}$	$(1.1-2.2) \times 10^{10}$
	$\delta_{Nm}$	0.03	0.04 – 0.08	0.04 – 0.08	0.04 – 0.08	0.04 – 0.08
198 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$3 \times 10^{11}$	$10^{12}$	$2.5 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{11}$	$7.5 \times 10^{11}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(1-1.7) \times 10^{10}$	$(7-15) \times 10^{10}$	$(2.5-5) \times 10^{10}$	$(3.4-5.1) \times 10^{10}$	$(3.8-9) \times 10^{10}$
	$\delta_{Nm}$	0.03–0.05	0.07–0.15	0.05–0.10	0.05–0.10	0.05–0.10
272 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$2.2 \times 10^{11}$	$9 \times 10^{11}$	$2.6 \times 10^{11}$	$4.5 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(1-2) \times 10^{10}$	$(6-15) \times 10^{10}$	$(1-2) \times 10^{10}$	$(1.7-3.4) \times 10^{10}$	$(3-6) \times 10^{10}$
	$\delta_{Nm}$	0.05–0.10	0.05–0.10	0.05–0.10	0.05–0.10	0.05–0.10
400 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$2 \times 10^{11}$	$3.5 \times 10^{11}$	$3.3 \times 10^{11}$	$10^{11}$	$2.4 \times 10^{11}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$10^{10}$	$(1.7-3.5) \times 10^{10}$	$(1.7-3.3) \times 10^{10}$	$(0.4-0.6) \times 10^{10}$	$(1-1.5) \times 10^{10}$
	$\delta_{Nm}$	0.05	0.05–0.10	0.05–0.10	0.04–0.06	0.04–0.06
510 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$0.8 \times 10^{11}$	$1.5 \times 10^{11}$	$2.5 \times 10^{11}$	$0.4 \times 10^{11}$	$0.6 \times 10^{11}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(0.5-0.7) \times 10^{10}$	$(0.7-1.5) \times 10^{10}$	$(1.2-2.5) \times 10^{10}$	$(0.2-0.4) \times 10^{10}$	$(0.3-0.6) \times 10^{10}$
	$\delta_{Nm}$	0.05–0.07	0.05–0.10	0.05–0.10	0.05–0.07	0.05–0.07

**Таблица 2.** Концентрация электронов  $N$ , абсолютная  $\Delta N_m$  и относительная  $\delta_{Nm}$  амплитуды ВВ для ночного времени

Высота	Параметр	Дата				
		8 ноября	9 ноября	10 ноября	11 ноября	12 ноября
125 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$4 \times 10^9$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(0.4-1.2) \times 10^9$	$(4-6) \times 10^9$	$(4-6) \times 10^9$	$(2.8-4.2) \times 10^9$	$(2.8-4.2) \times 10^9$
	$\delta_{Nm}$	0.1–0.3	0.2–0.3	0.2–0.3	0.2–0.3	0.2–0.3
198 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(2.3-4) \times 10^9$	$(5-15) \times 10^9$	$(8-12) \times 10^9$	$(2-4) \times 10^9$	$(1.4-2.8) \times 10^9$
	$\delta_{Nm}$	0.15–0.25	0.1–0.3	0.2–0.3	0.1–0.2	0.1–0.2
272 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$2.2 \times 10^{10}$	$4.5 \times 10^{10}$	$4.3 \times 10^{10}$	$7.5 \times 10^{10}$	$7 \times 10^{10}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(2.2-4.4) \times 10^9$	$(4.5-9) \times 10^9$	$(4.3-6.4) \times 10^9$	$7.5 \times 10^9$	$7 \times 10^9$
	$\delta_{Nm}$	0.1–0.2	0.1–0.2	0.10–0.15	0.1	0.1
400 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$2 \times 10^{10}$	$(1-2) \times 10^{10}$	$(0.5-1.0) \times 10^{10}$	$(1-2) \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(4-6) \times 10^9$	$(1-4) \times 10^9$	$(0.5-2) \times 10^9$	$(1-2) \times 10^9$	$2 \times 10^9$
	$\delta_{Nm}$	0.2–0.3	0.1–0.2	0.1–0.2	0.1	0.1
510 км	$N, \text{ м}^{-3}$	$3 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$	$5 \times 10^9$	$2 \times 10^{10}$	$3.7 \times 10^{10}$
	$\Delta N_m, \text{ м}^{-3}$	$(4.5-7.5) \times 10^9$	$(3-6) \times 10^9$	$(0.5-1.0) \times 10^9$	$(2-4) \times 10^9$	$(3.7-5.5) \times 10^9$
	$\delta_{Nm}$	0.15–0.25	0.1–0.2	0.1–0.2	0.1–0.2	0.1–0.15



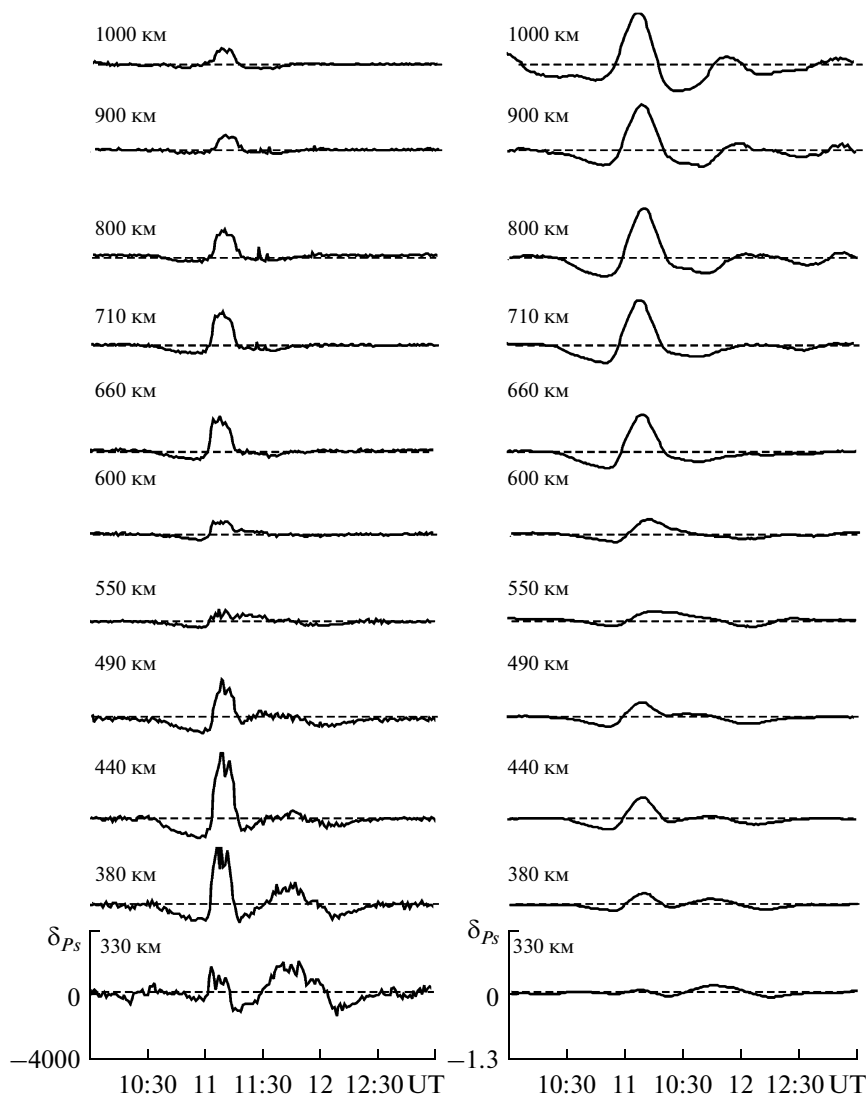
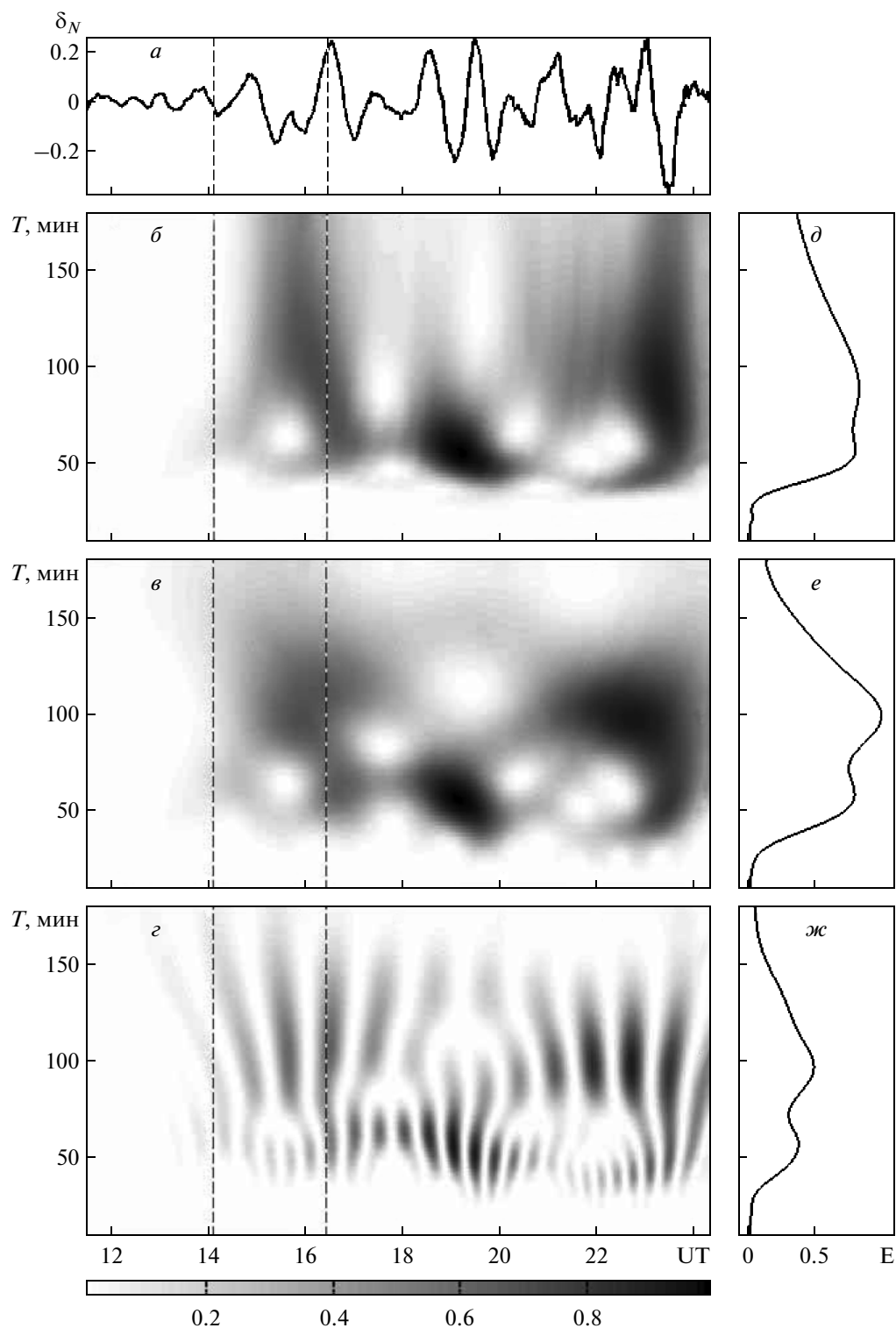


Рис. 6. Временные вариации возмущений  $\delta P_s$  и относительных возмущений  $\delta P_s / \bar{P}_s = \delta P_s / \bar{P}_s$  мощности рассеянного сигнала 10 ноября 2004 г. вблизи главной фазы магнитной бури. На временных зависимостях указана наклонная дальность до рассеивающего объема.

Какова природа солитоноподобного возмущения? Аномально большие значения  $\delta P_{s0} / \bar{P}_s$ , достигающие 1.3–1.4, свидетельствуют о том, что вариации  $\delta P_s$  не связаны с некогерентно-рассеянным сигналом. В противном случае имело бы место увеличение  $N$  в 2.3–2.4 раза на высотах 500–1000 км. Физических причин для такого увеличения нет. Остается предположить, что вариации  $\delta P_s$  вызваны когерентным рассеянием зондирующих сигналов на неоднородностях плазмы нетепловой природы. Такое рассеяние на высотах  $E$ -области ионосферы систематически наблюдается в высоких широтах. Рассеяние ракурсного характера вызывается неоднородностями ионосферной плазмы, генерируемыми, в основном, двухпоточковой и градиентно-

дрейфовой неустойчивостями. Последние возникают, когда компонента  $E_y$  электрического поля ионосферно-магнитосферного происхождения достигает порогового значения, близкого к 10–20 мВ/м. Если в высоких широтах  $E_y$  может достигать 50 мВ/м, в средних широтах в спокойных условиях эта компонента обычно не превышает единиц мВ/м. И только во время сильных геокосмических бурь  $E_y$  может достичь порогового значения, а значит, возникают условия для генерации неустойчивостей.

О существенном увеличении  $E_y$  в интервале времени 10:30–13:00 10 ноября 2004 г. свидетельствует увеличение высоты максимума концентрации электронов в области  $F$  ионосферы на 150–180 км



**Рис. 7.** Результаты спектрального анализа временных вариаций  $\delta_N(t)$  8 ноября 2004 г. для высоты 200 км: *a* – сигнал; *б, в, г* – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования сигнала; *д, е, ж* – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования сигнала.

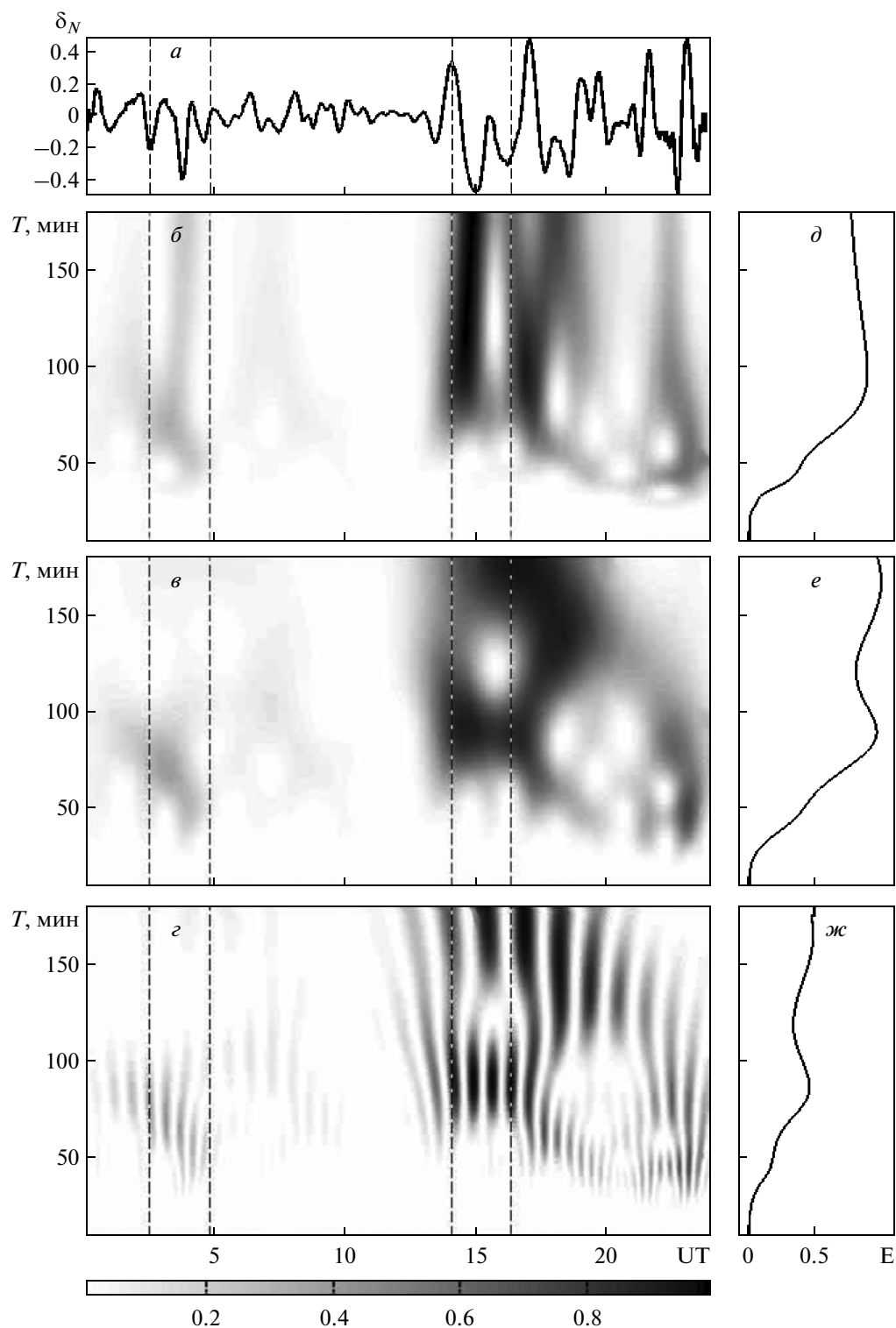


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, для 9 ноября 2004 г.

[Григоренко и др., 2007в]. В цитируемой работе также продемонстрировано, что в процессе геокоsmической бури 10 ноября 2004 г. среднеширотная ионосфера приобретала черты высокоширотной. В

частности, авроральный овал и главный ионосферный провал значительно смещались в сторону средних широт. Это означает, что упомянутые неустойчивости генерировались и в среднеширотной ионосфе-

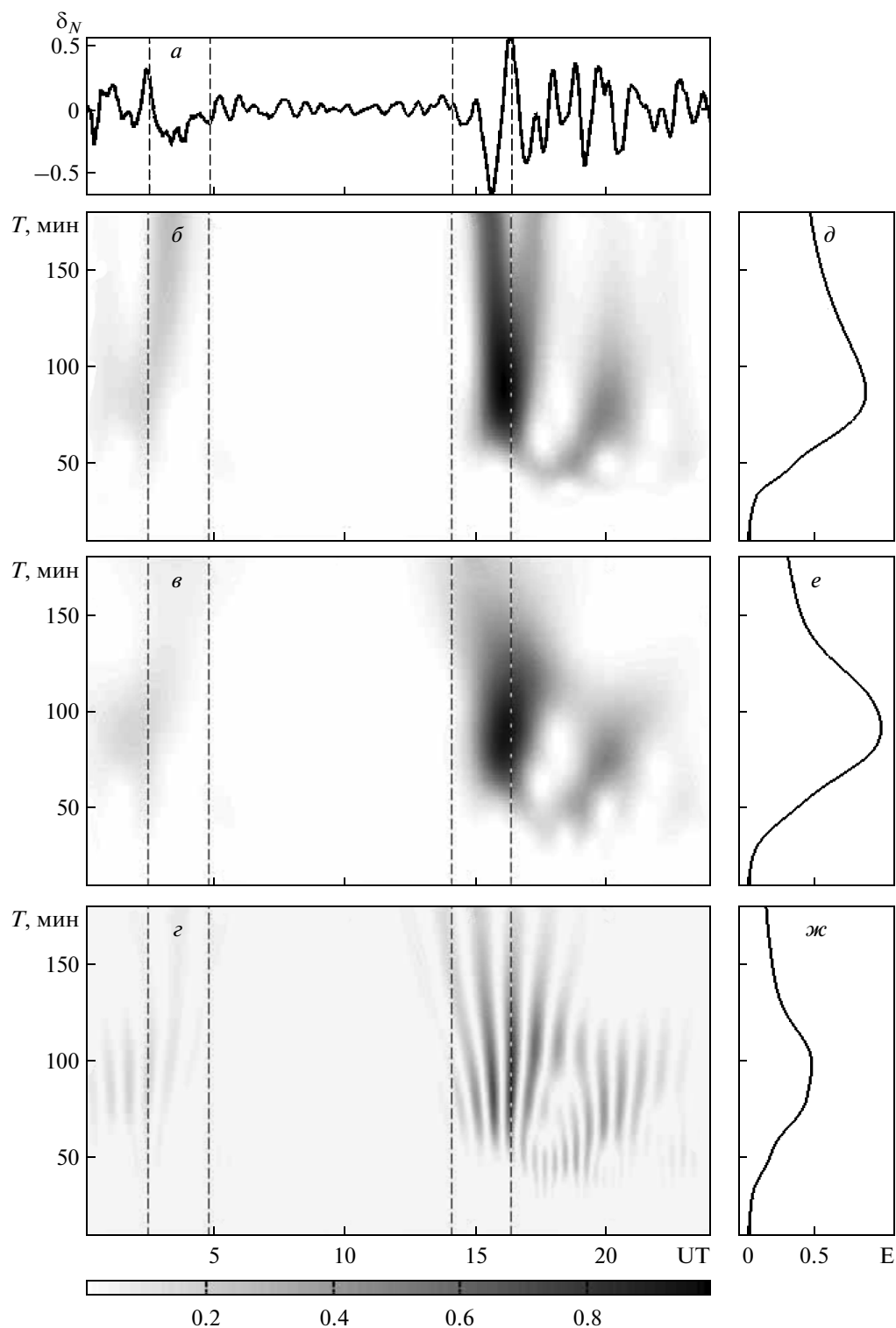


Рис. 9. То же, что и на рис. 7, для 10 ноября 2004 г.

ре. Поскольку мощность когерентного рассеяния на много порядков превосходит мощность НР, когерентно-рассеянные сигналы, имеющие ракурсный характер, могли приниматься с северного направле-

ния боковыми лепестками диаграммы направленности антенны. Такие сигналы, названные когерентными эхом, в условиях возмущенной среднеширотной ионосферы наблюдались и ранее [Афраймович

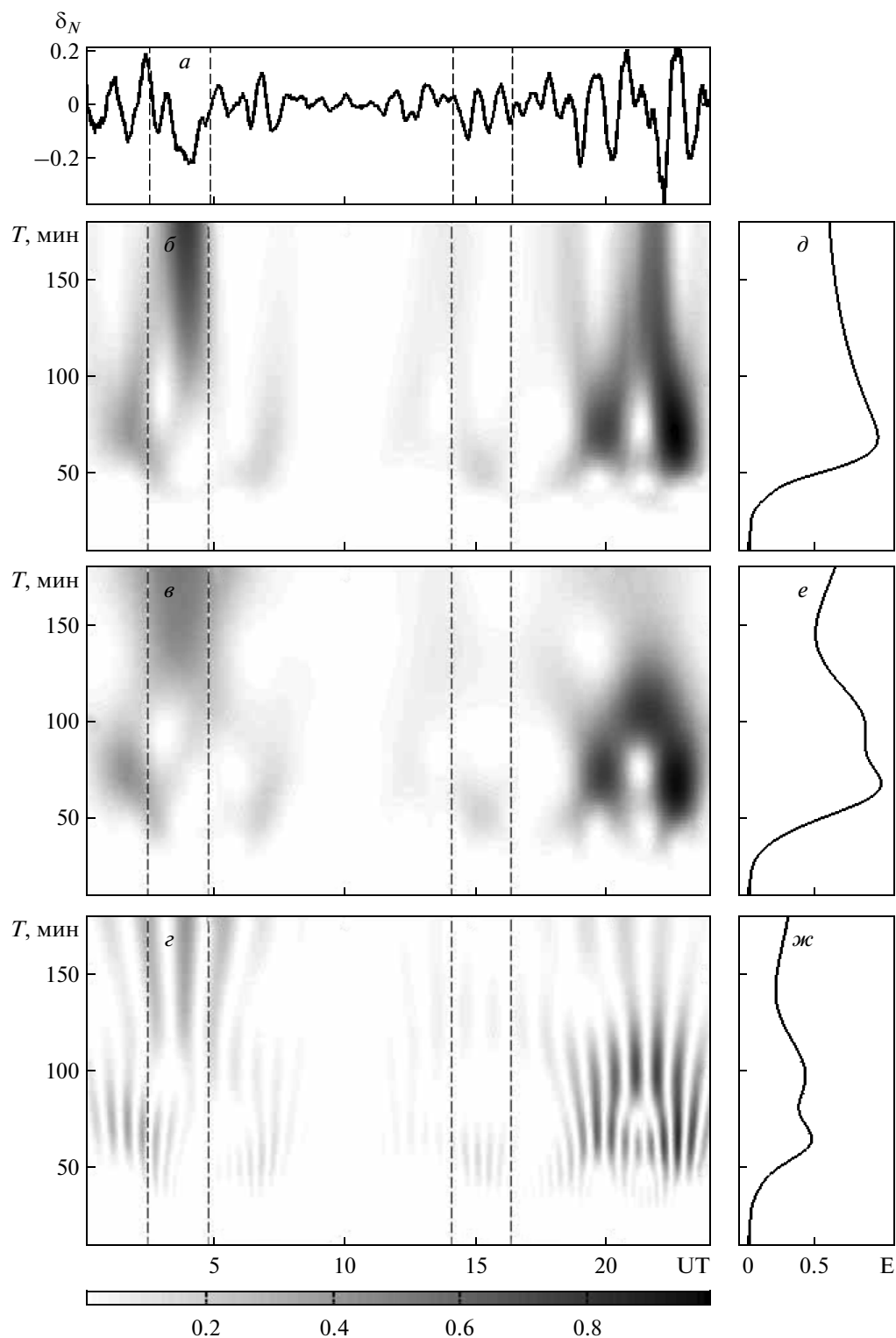


Рис. 10. То же, что и на рис. 7, для 11 ноября 2004 г.

и др., 2001; Бернгарт и др., 2004; Лысенко и Черняк, 2004; Золотухина и др., 2007]. О ракурсном характере рассеяния свидетельствуют максимумы в зависимостях  $\delta P_s(R)$  (см. рис. 6).

Таким образом, есть основания считать, что солитоноподобное возмущение вызвано наклонными когерентными отражениями (ракурсным рассеянием) зондирующих радиосигналов.

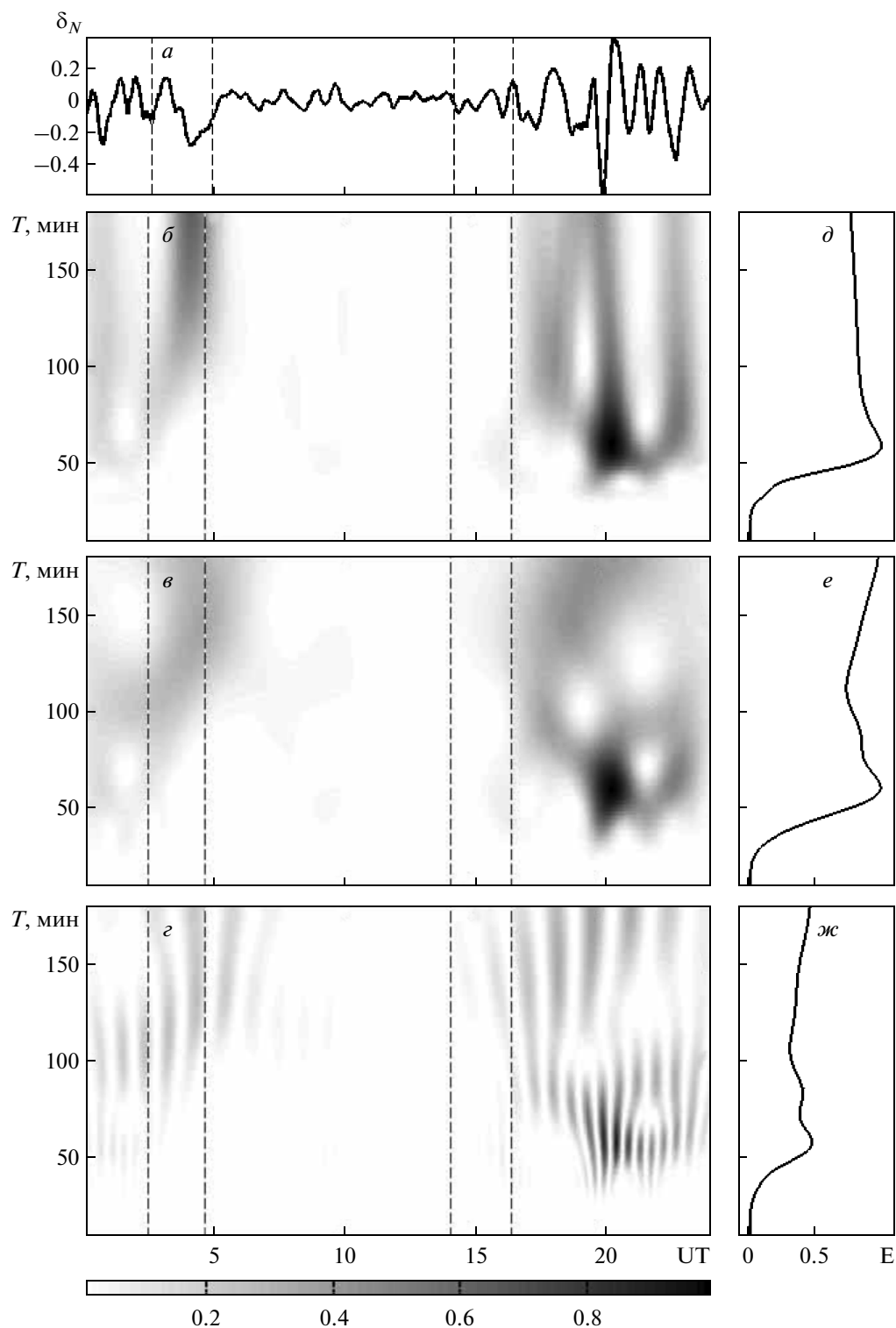


Рис. 11. То же, что и на рис. 7, для 12 ноября 2004 г.

## 7. ВЫВОДЫ

Сильнейшие геокосмические бури 7–10 ноября 2004 г. сопровождались интенсивными отрицательными ионосферными бурями. Это привело к

существенным изменениям волновой активности в ионосфере.

1. Установлено, что в периоды отрицательных ионосферных бурь абсолютная амплитуда ВВ кон-

центрации электронов уменьшалась в 2–10 раз. Относительная амплитуда при этом изменялась незначительно.

2. Продолжительности откликов волновой активности на ионосферные бури 8 и 10 ноября были около суток и не менее трех суток соответственно.

3. Показано, что максимальные значения абсолютных и относительных амплитуд имели место на высотах 200–270 км.

4. Найдено, что в дневное время относительная амплитуда ВВ концентрации электронов обычно составляла 0.05–0.10. В ночное время она равнялась 0.1–0.2, часто достигала значений 0.25–0.30, а иногда и 0.4–0.5.

5. Обнаружено, что ионосферная буря 10 ноября сопровождалась генерацией солитоноподобного возмущения в диапазоне дальностей 230–1000 км. Его длительность была около 100–140 мин, средний период составлял 50–55 мин. Появление возмущения связано с наклонными когерентными отражениями зондирующих сигналов.

Солитоноподобное возмущение наблюдалось вблизи главной фазы магнитной бури 10 ноября 2004 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика // Пер. с англ. 1 часть. М.: Мир, 384 с. 1974.
- *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика // Пер. с англ. 2 часть. М.: Мир, 512 с. 1975.
- *Астанин Л.Ю., Костылев А.А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь. 1989.
- *Афраймович Э.Л., Бернгардт О.И., Золотухина Н.А., Шпынев Б.Г.* Корреляция  $P_{\Sigma}$  пульсаций геомагнитного поля, вариаций полного электронного содержания и мощности эхо-сигнала обратного рассеяния во время большой магнитной бури 24–25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 4. № 5. С. 595–603. 2001.
- *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ИСЗФ СО РАН. 480 с. 2006.
- *Бернгардт О.И., Золотухина Н.А., Шпынев Б.Г.* Особенности спектральных характеристик когерентного эха в магнитную бурю 15–17 июля 2000 г. по наблюдениям Иркутского радара некогерентного рассеяния. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 6. С. 787–798. 2004.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 4. С. 518–534. 2004а.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 9. № 1. С. 5–28. 2004б.
- *Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Черногор Л.Ф.* Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // Космічна наука і технологія. Т. 11. № 1/2. С. 37–57. 2005а.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 3. С. 4–35. 2005б.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 193–208. 2006а.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 209–218. 2006б.
- *Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 11. С. 3–24. 2007.
- *Бурмака В.П., Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // Космічна наука і технологія. Т. 14. № 4. С. 82–91. 2008.
- *Григоренко Е.И., Лазоренко С.В., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 6. С. 770–787. 2003.
- *Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф., Черняев С.В.* Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30–31 мая 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 6. С. 803–823. 2005.
- *Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф.* Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. Т. 13. № 4. С. 62–76. 2007а.
- *Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф.* Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. Т. 13. № 4. С. 77–90. 2007б.
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 6. С. 761–779. 2007в.
- *Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др.* Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 6. С. 723–763. 2005.
- *Золотухина Н.А., Бернгардт О.И., Шпынев Б.Г.* Исследование магнитосферных возмущений, сопровождающихся сигналами среднеширотного когерентного

- эха. // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 47. № 3. С. 364–372. 2007.
- Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. Монография. Харьков. ХНУ имени В.Н. Каразина. 2009.
  - Лысенко В.Н., Черняк Ю.В. Особенности методики определения параметров ионосферной плазмы во время естественных возмущений в ионосфере // Космічна наука і технологія. Т. 10. № 5/6. С. 110–113. 2004.
  - Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Проявления геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 47. № 5. С. 646–658. 2007.
  - Таран В.И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 41. № 5. С. 659–666. 2001.
  - Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиопизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003а.
  - Черногор Л.Ф. Земля–атмосфера–геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. Т. 9. № 5/6. С. 96–105. 2003б.
  - Черногор Л.Ф. Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. Т. 4. № 12. С. 655–697. 2006.
  - Черногор Л.Ф. Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. Т. 5. № 4. С. 198–231. 2007.
  - Buonsanto M.J. *Ionospheric Storms – a Review* // Space Sci. Rev. V. 88. P. 563–601. 1999.
  - Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lysenko V.N., Taran V.I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 7. G13001, doi:10.1029/2005GI000125. 2007.
  - Chernogor L.F., Rozumenko V.T. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. V. 13. № 2. P. 120–137. 2008.
  - Daglis I.A., Kozyra J.U., Kamide Y., Vassiliadis D., Sharma A.S., Liemohn M.W., Gonzales W.D., Tsurutani B.T., Lu G. Intense space storms: Critical issues and open disputes // J. Geophys. Res. V. 108. № 5. 1208, doi: 10.1029/2002JA009722. 2003.
  - Gonzales W.D., Jozelyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. № A4. P. 5771–5792. 1994.
  - Lin C.H., Richmond A.D., Lin J.Y., Yen H.C., Paxton L.J., Lu G., Tsai H.F., Su S.-Y. Large-scale variations of the low-latitude ionosphere during the October – November 2003 superstorm: Observational results // J. Geophys. Res. V. 110. A09S28, doi: 10.1029/2004JA010900. 2005.