

УДК 550.385:550.388

## СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 1 АВГУСТА 2008 г. НАД ХАРЬКОВОМ. 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ

© 2013 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; Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 02.11.2009 г.

После доработки 15.02.2012 г.

Проанализированы квазипериодические вариации мощности некогерентно рассеянных сигналов, вызванные волновыми возмущениями концентрации электронов в ионосфере, в день частного солнечного затмения и в фоновый день. Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразования. В день солнечного затмения и в фоновый день спектральные характеристики волновых возмущений на высотах 100–500 км в диапазоне периодов 10–120 мин заметно отличались. Изменения спектрального состава начинались вблизи наступления фазы максимального покрытия диска Солнца и продолжались не менее 2 ч. Амплитуда временных вариаций  $N$  составляла  $2 \times 10^9 - 4 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ , а относительная амплитуда – 0.10–0.15. Проведенное сравнение волновых возмущений для пяти солнечных затмений показало, что в течение всех этих событий заметно изменяется спектральный состав волновых возмущений.

DOI: 10.7868/S0016794013040044

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследования методом некогерентного рассеяния (НР) пространственно-временной структуры вариаций регулярных (усредненных) параметров ионосферы, вызванных частным затмением Солнца (ЗС) 1 августа 2008 г. над Харьковом, изложены в части 1 настоящей работы [Домнин и др., 2013].

В целом регулярные (квазидетерминированные) ионосферные эффекты ЗС изучены более или менее хорошо. Значительно хуже дело обстоит с изучением нерегулярных (флуктуационных) эффектов и волновых возмущений (ВВ) параметров плазмы, которые могут быть вызваны ЗС.

Авторы [Chimonas and Hines, 1970] впервые предсказали, что ЗС способны генерировать акустико-гравитационные волны. Впоследствии было предпринято немало попыток, направленных на достоверное подтверждение гипотезы [Chimonas and Hines, 1970]. Попытки одних авторов (см., например, [Davis and da Rosa, 1970; Ishinose and Ogawa, 1976; Broche et al., 1976; Bertin et al., 1977; Butcher et al., 1979; Jones et al., 2004]) увенчались успехом. Другим авторам (см., например, [Beer and May, 1972; Chandra et al., 1980; Deshpande et al., 1982]) не удавалось уверенно зарегистрировать волны, вызванные ЗС.

К сожалению, до настоящего времени нет единого мнения об эффективности генерации ВВ за-

тмениями. Тем более не ясно, какие параметры могут иметь эти ВВ.

Для поиска ВВ, генерируемых ЗС, нами проведен анализ результатов измерений, выполненных на радаре НР. Как известно, метод НР относится к высокоинформативным и весьма точным методам диагностики физических процессов в ионосфере в широком диапазоне высот. В частности, метод позволяет выявлять достаточно слабые (относительная амплитуда возмущений концентрации электронов 0.1–1%) квазипериодические процессы в ионосфере и оценивать их основные параметры.

Целью части 2 работы является изложение результатов наблюдения ВВ (квазипериодических процессов) в ионосфере, сопутствовавших ЗС 1 августа 2008 г., и обсуждение связи этих процессов с затмением.

В части 3 статьи будут описаны результаты расчетов, их сравнение с результатами наблюдений, а также будет проведено обсуждение полученных результатов.

### 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАТМЕНИИ СОЛНЦА

В месте расположения ионосферной обсерватории, вблизи г. Харькова (Украина), ЗС началось в 09:11 (здесь и далее время UT), закончилось в

11:17. Максимальное покрытие диаметра диска Солнца составляло 0.42. Оно имело место в 10:15 (14:15 по московскому времени, или в ~13:37 местного времени).

Более подробные сведения о затмении изложены в части 1 настоящей работы [Домнин и др., 2013].

### 3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Основные сведения о радаре НР представлены в части 1 настоящей работы [Домнин и др., 2013].

*Методы статистического анализа сигнала.* Результаты измерений были обработаны по методикам, описанным нами в работах [Бурмака и др., 2004а, б].

Перечислим кратко основные этапы статистической обработки мощности смеси сигнала и шума  $P_{sn}$  и мощности шума  $P_n$ , существенные при выявлении ВВ.

Сначала на интервале времени  $\Delta T_0 = 1$  мин находятся базовые оценки мощности шума  $P_{n0}$  и мощности сигнала  $P_{s0} = P_{sn0} - P_{n0}$  для каждой высоты. Как известно, такое значение  $\Delta T_0$  намного превосходит интервал корреляции как  $P_{sn}$ , так и  $P_n$  (оба порядка  $10^{-3}$  с).

На первом этапе вычисляются скользящие средние значения мощностей  $P_{s1}$  и  $P_{n1}$  по  $n_1 = 180$  отсчетам (тренды во временных зависимостях  $P_{s1}(t)$ ,  $P_{n1}(t)$ ), т.е.  $P_{s1} = \langle P_{s0} \rangle$  и  $P_{n1} = \langle P_{n0} \rangle$  (угловыми скобками обозначен результат усреднения), и разность между  $P_{s0}$  и  $P_{s1}$ :

$$\langle P_{s0} \rangle = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} P_{s0}(i),$$

$$\delta P_{s1} = P_{s0} - \langle P_{s0} \rangle.$$

При этом отношение сигнал/шум  $q = P_{s1}/P_{n1}$ .

На втором этапе вычисляется скользящее среднее  $\delta P_{s2}$  по  $n_2$  (в данной работе  $n_2 = 5$ ) отсчетам:

$$\delta P_{s2} = \langle \delta P_{s1} \rangle = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \delta P_{s1}(i).$$

При изучении волновых процессов в ионосфере представляет интерес оценка относительной амплитуды квазипериодических вариаций электронной концентрации  $\delta N_m = \Delta N_m / N_0$ , где  $\Delta N_m$  – амплитудное значение  $\Delta N$ . Последняя равна

$$\delta N_m \approx \frac{\delta P_{s2m}}{P_{s1}} = \frac{\langle \delta P_{s1} \rangle_m}{P_{s1}},$$

где  $\delta P_{s2m} = \langle \delta P_{s1} \rangle_m$  – амплитуда колебаний в зависимости  $\delta P_{s2}(t)$ .

Относительная ошибка в оценке  $\delta N_m$  дается следующим соотношением [Бурмака и др., 2004а, б]:

$$\tilde{\sigma}_N = \sqrt{\frac{(1+q)^2 + m^{-1} \left(1 + \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{1+n_1}{n_2}\right)}{q^2 n_0 n_1}}.$$

Здесь  $n_0 = F_0 \Delta T_0$ ,  $F_0$  – частота повторения импульсов,  $m$  – число выборок мощности шума для каждой радиолокационной развертки. Поскольку  $m \gg 1$ ,  $n_1 \gg 1$  и  $\delta_{Nm}^2 n_2 \ll n_1$ ,

$$\tilde{\sigma}_N \approx \frac{1+q}{q \delta_{Nm} \sqrt{n_0 n_2}}.$$

Полученные сглаженные значения  $\delta P_{s2}$  пропорциональны абсолютным значениям вариаций  $\delta N$  электронной концентрации  $N$  на данной высоте. В то же время относительные вариации  $N$  равны  $\delta N = \delta N / N \approx \delta_s = \delta P_{s2} / P_{s1}$ .

Далее по временным рядам  $\delta P_{s2}$  вычислялись нормированные ряды безразмерного параметра, характеризующего вариации мощности рассеянного сигнала (а значит и  $\delta N$ ),  $\delta_q = k (\delta P_{s2} / \bar{P}_n)$ ,

где  $\bar{P}_n$  – средний уровень шума за время наблюдения,  $k = \frac{P_{\max}}{P} \frac{\tau_{p\max}}{\tau_p} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}} \frac{T_{\text{сист}}}{T_{\text{сист}\max}}$  (параметры с ин-

дексом “max” обозначают максимальные значения из 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. Введение коэффициента  $k$  позволяет сравнивать  $\delta_q$ , полученные в разных измерительных кампаниях.

Для определения абсолютных значений  $\delta N$  по  $\delta_q$  производится калибровка последних.

Заметим, что для возможности сравнения амплитуд ВВ на разных высотах  $z$  учитывалась зависимость  $P_s \sim z^{-2}$  (или зависимость отношения сигнал/шум  $q \sim z^{-2}$ ). При этом также исключалась и зависимость  $P_s$  от температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ .

*Методы спектрального анализа.* Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП), более подробно описанные в работах [Лазоренко и др., 2006; Бурмака и др., 2007в; Черногор, 2008].

Как известно, ОПФ имеет вид:

$$\hat{S}[f(t)] \equiv Sf(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt,$$

где  $g(t)$  – вещественная оконная функция, обладающая свойством локализованности вдоль оси времени  $t$ ;  $\tau$  – параметр, описывающий смещение оконной функции относительно сигнала вдоль временной оси,  $\omega$  – круговая частота.

АПФ преобразование может быть записано в виде

$$\hat{A}[f(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g\left(\frac{t - \tau}{a}\right) \exp\left[-i\pi\nu\left(\frac{t - \tau}{a}\right)\right] dt.$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент ( $\nu > 0$ ), равный числу периодов гармонической функции, укладываемых на ширине оконной функции при данном параметре масштабирования  $a > 0$ .

Далее для ОПФ и АПФ в работе используются следующие выражения:

$$Sf(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{wS}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g\left(\frac{t - \tau}{t_{wS}/2}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi t}{T}\right) dt,$$

$$A_\nu f(T_\nu, \tau) = \sqrt{\frac{2}{\nu T_\nu}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g\left(\frac{t - \tau}{\nu T_\nu/2}\right) \times \exp\left(-i\frac{2\pi}{T_\nu}(t - \tau)\right) dt,$$

где  $t_{wS}$  – ширина окна для ОПФ;  $T = 2\pi/\omega$  и  $T_\nu = 2a/\nu$  – величины, имеющие физический смысл текущих значений периода. Перейдем к относительным периодам:  $\tilde{T} = T/t_{wS}$  и  $\tilde{T}_\nu = T_\nu/t_{wS}$ . Для удобства все параметры здесь представлены в относительных (безразмерных) единицах.

В данной работе для ОПФ и АПФ в качестве  $g(t)$  использовалось окно, имеющее вид (см., например, [Лазоренко и др., 2006]):

$$g_H(t) = \gamma[0.54 + 0.46 \cos \pi t],$$

где  $\gamma \approx 1.12$  – нормирующий множитель.

Для ВП в качестве  $\psi(t)$  применялся вейвлет Морле, который задается выражением

$$\psi(t) = \exp\left(-t^2/2\right) \cos 5t.$$

Здесь, как и выше,  $t$  – безразмерное время. Предполагалось, что вейвлет Морле будет удобен для анализа коротких цугов волн, которые, как правило, и наблюдаются в ионосфере.

Непрерывное ВП функции  $f(t)$  имеет вид:

$$\hat{W}[f(t)] \equiv Wf(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t - b}{a}\right) dt,$$

где символом \* обозначается комплексное сопряжение, а разложение производится по базису вейвлетов

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} \Psi\left(\frac{t - b}{a}\right),$$

где, как и выше,  $a$  – параметр масштабирования,  $b$  – параметр сдвига.

Кроме функций  $P_S(\tilde{T}, \tau)$ ,  $P_A(\tilde{T}, \tau)$  и  $P_W(\tilde{T}, \tau)$ , в работе также анализируются так называемые энергограммы [Лазоренко и др., 2006; Бурмака и др., 2007в; Черногор, 2008]:

$$E_S(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(\tilde{T}, \tau) d\tau; \quad E_A(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(\tilde{T}, \tau) d\tau;$$

$$E_W(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_W(\tilde{T}, \tau) d\tau.$$

Сравнение возможностей ОПФ, АПФ и ВП при оценке спектров, а также обоснование целесообразности их совместного использования даны в работах [Лазоренко и др., 2006; Бурмака и др., 2007в; Черногор, 2008].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

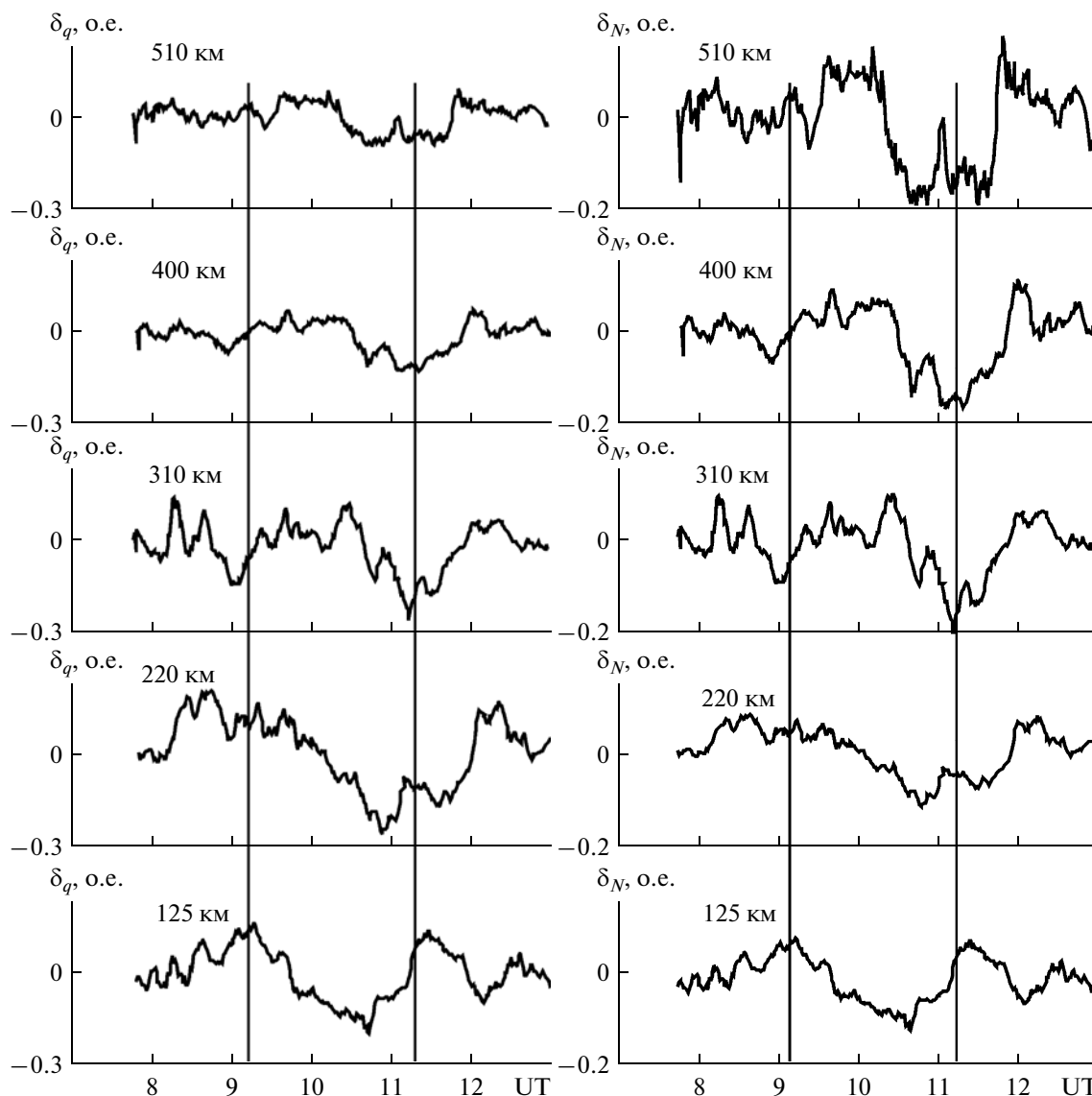
Как отмечалось в части 1 настоящей работы [Домнин и др., 2013], день 1 августа 2008 г. в геофизическом отношении был спокойным. Это обстоятельство облегчало выделение возмущений, связанных с затмением.

Временные вариации амплитуд ВВ концентрации электронов  $\delta_q$  (в о.е., 1 о.е.  $\approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ) и их относительных значений  $\delta_N$  показаны на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

Из сравнения рисунков 1 и 2 видно, что временные зависимости  $\delta_q$  1 и 2 августа заметно отличались. В день ЗС в интервале времени 10:00–11:00 наблюдался глубокий минимум в зависимости  $\delta_q(t)$ . Этот минимум имел место на всех высотах (от 125 до 510 км). После минимума наблюдалось колебание с квазипериодом  $\sim 70$  мин. Его амплитуда  $\delta_{qm}$  была наибольшей в диапазоне высот 125–160 км. По мере увеличения высоты  $\delta_{qm}$  постепенно уменьшалась: на высоте 125 км  $\delta_{qm} \approx 0.4$  о.е., а на высоте  $\sim 500$  км  $\delta_{qm} \approx 0.02$  о.е.

В фоновый день амплитуда  $\delta_{qm}$  достигала максимальных значений в диапазоне высот 180–220 км, равных 0.2 о.е. На высоте  $\sim 500$  км  $\delta_{qm} \approx 0.1$  о.е., т.е. уменьшилась всего примерно в 2 раза.

Из рисунка 1 видно, что в день ЗС амплитуда  $\delta_{Nm}$  достигала 0.10–0.15 на высотах 125–200 км. С увеличением высоты она несколько убывала. В интервале времени 10:00–11:00 происходило раз-



**Рис. 1.** Временные вариации возмущений  $\delta_q$  (в о.е.) и относительных возмущений  $\delta_N$  концентрации электронов во время ЗС 1 августа 2008 г. (вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца затмения). О.е. составляет  $10^{11} \text{ м}^{-3}$ .

рушение существовавших квазипериодических колебаний, изменение их спектрального состава.

В фоновый день временная зависимость  $\delta_N$  не испытывала значительных скачков (см. рис. 2). Значения  $\delta_{Nm} \approx 0.10\text{--}0.15$  имели место в диапазоне высот 180–220 км. С увеличением высоты амплитуда  $\delta_{Nm}$  уменьшалась незначительно. Мало также изменялся на данной высоте спектральный состав вариаций  $\delta_N(t)$ .

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Спектральный анализ осуществлялся в диапазоне периодов 10–180 мин. Поскольку амплитуды гармоник отличались в десятки раз, оказалось

целесообразным анализ выполнить отдельно для поддиапазонов 10–25; 25–65 и 65–180 мин.

Примеры результатов спектрального анализа для высоты 200 км представлены на рис. 3–5 для дня с ЗС и на рис. 6–8 для фонового дня. На этой высоте вариации  $\delta N$  и  $\delta_N$  выражены наиболее сильно.

В поддиапазоне периодов 15–25 мин квазипериодические процессы наблюдались в интервалах времени 08:30–09:00; 09:40–10:35 и 11:25–12:00 (см. рис. 3). В фоновый день подобные колебания также эпизодически возникали (см. рис. 6).

В день ЗС значительное усиление квазипериодических процессов с  $T \approx 50\text{--}65$  мин имело место в интервалах времени 08:10–08:40; 10:30–11:00 и

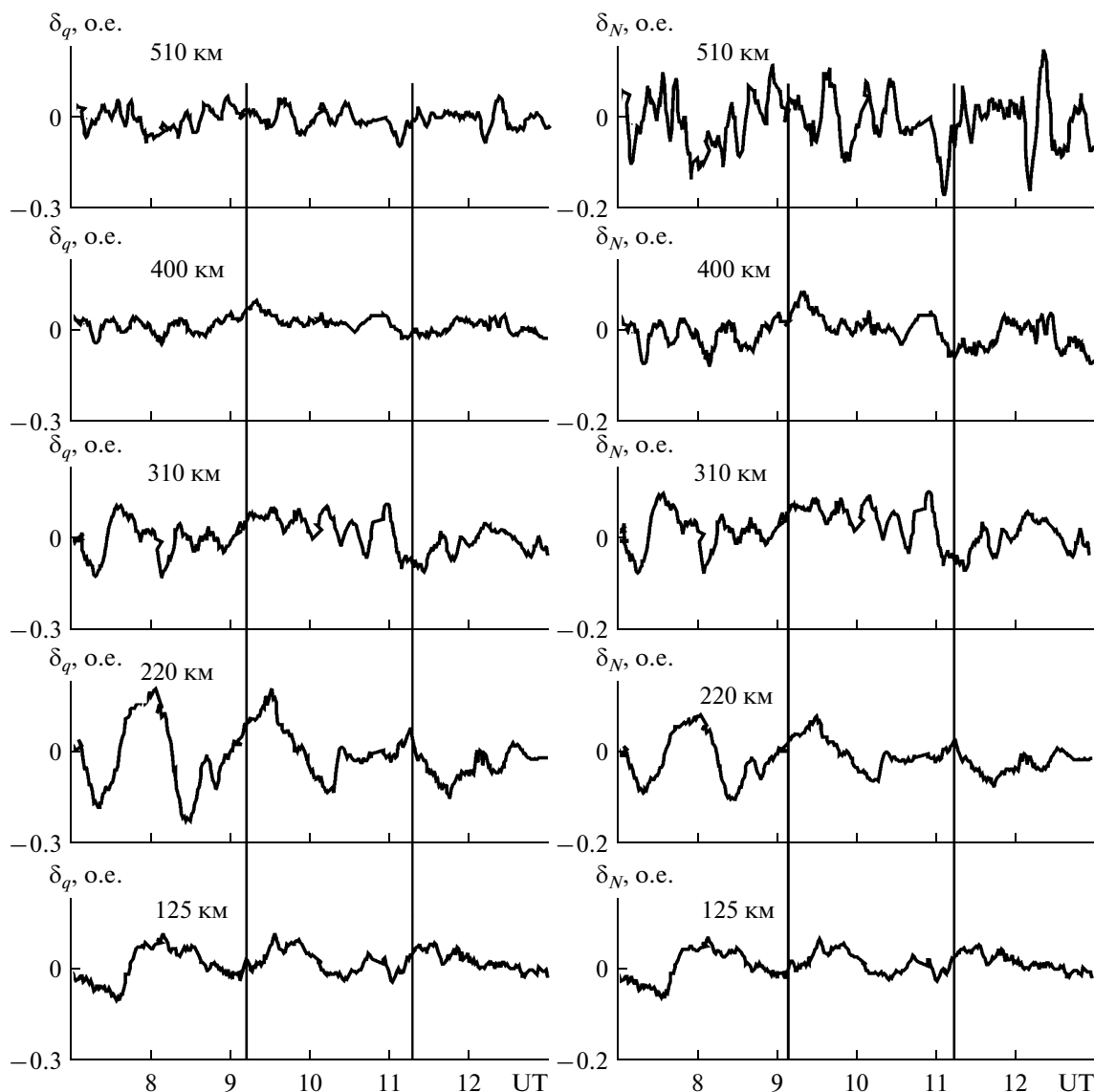


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для фонового дня 2 августа 2008 г.

11:20–12:00 (см. рис. 4). 2 августа наиболее сильное колебание с  $T \approx 45$ –65 мин наблюдалось с 07:50 до 08:20 (см. рис. 7).

В течение затмения был ярко выражен процесс с  $T \approx 150$ –180 мин, его продолжительность составляла 1–2 ч (см. рис. 5). В фоновый день наиболее сильный процесс наблюдался в интервале времени 08:00–10:00, при этом  $T \approx 80$ –120 мин (см. рис. 8).

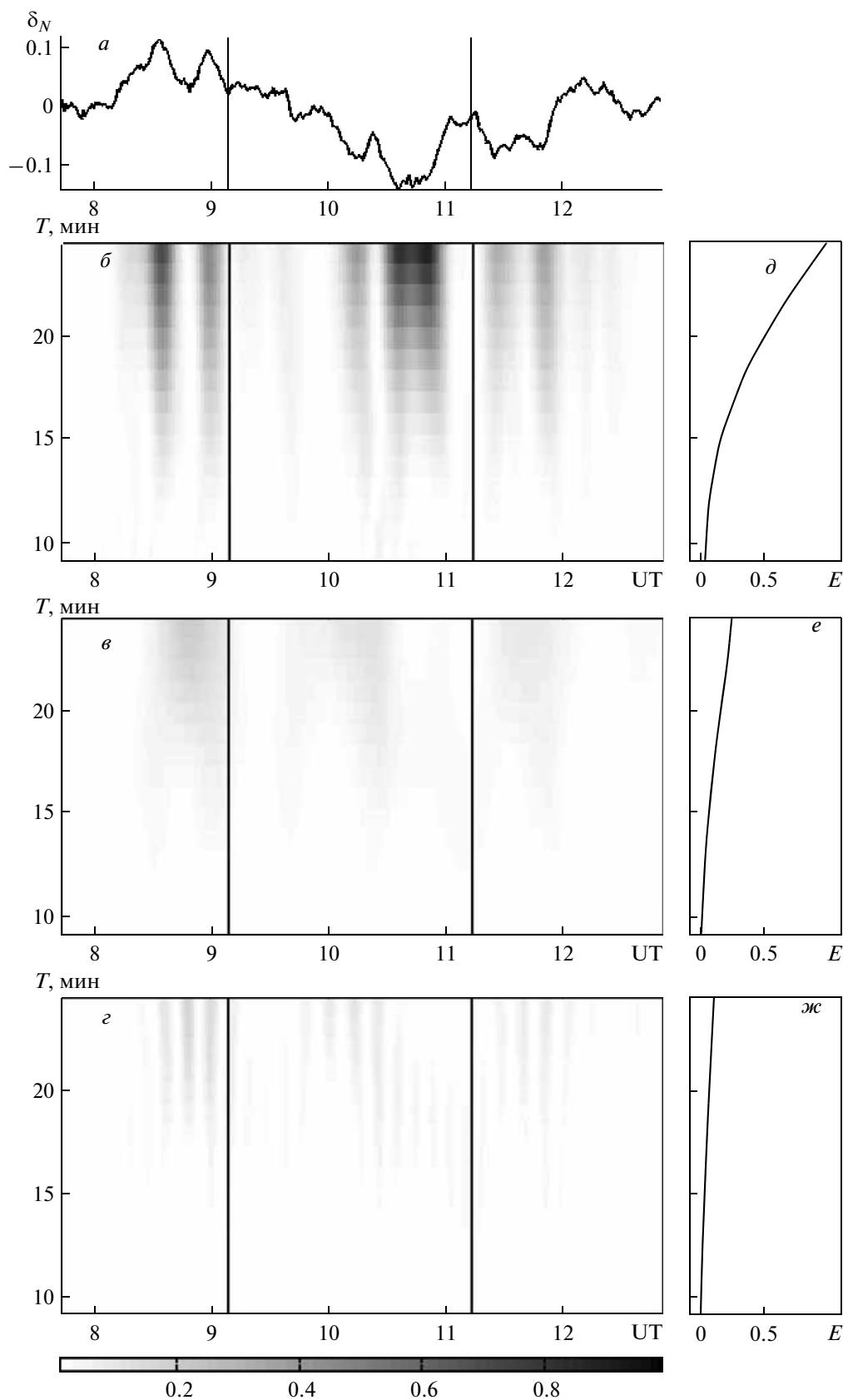
Таким образом, спектральный состав возмущений  $\delta_N$  1 и 2 августа существенно отличался.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Выше показано, что временные зависимости  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$  в день ЗС и в фоновый день заметно

отличались. Различались и спектры этих процессов. Главное отличие в зависимостях  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$  заключалось в появлении глубокого минимума после наступления главной фазы затмения, что отражает факт уменьшения концентрации электронов  $N$  в ионосфере. После этого момента времени в спектрах процессов  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$  заметно усилились составляющие с периодами 20–25; 50–65 и 150–180 мин. Важно, что поведение спектральных компонент с такими же периодами в фоновый день было другим.

Таким образом, не вызывает сомнений тот факт, что в процессе ЗС происходило изменение спектрального состава возмущений в ионосфере. Возникает вопрос: это изменение вызвано нестационарными процессами, стимулированными



**Рис. 3.** Результаты спектрального анализа временных вариаций  $\delta_N(t)$  1 августа 2008 г. для высоты 200 км в диапазоне периодов 10–25 мин: *a* – исходная зависимость; *б, в, з* – спектрограммы (в о.е.) соответственно оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования; *д, е, ж* – энергограммы (в о.е.) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования.

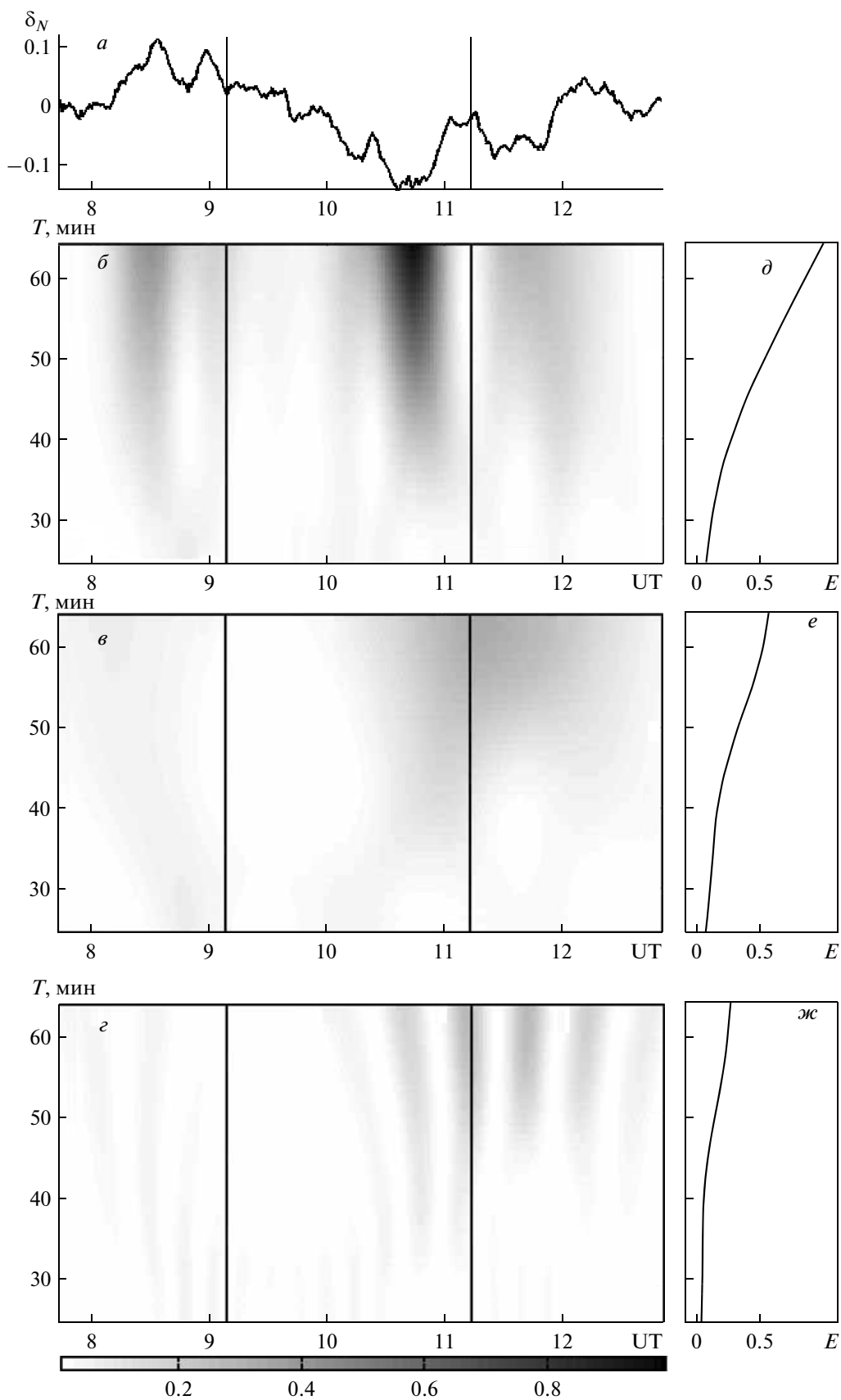


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, в диапазоне периодов 25–65 мин для 1 августа 2008 г.

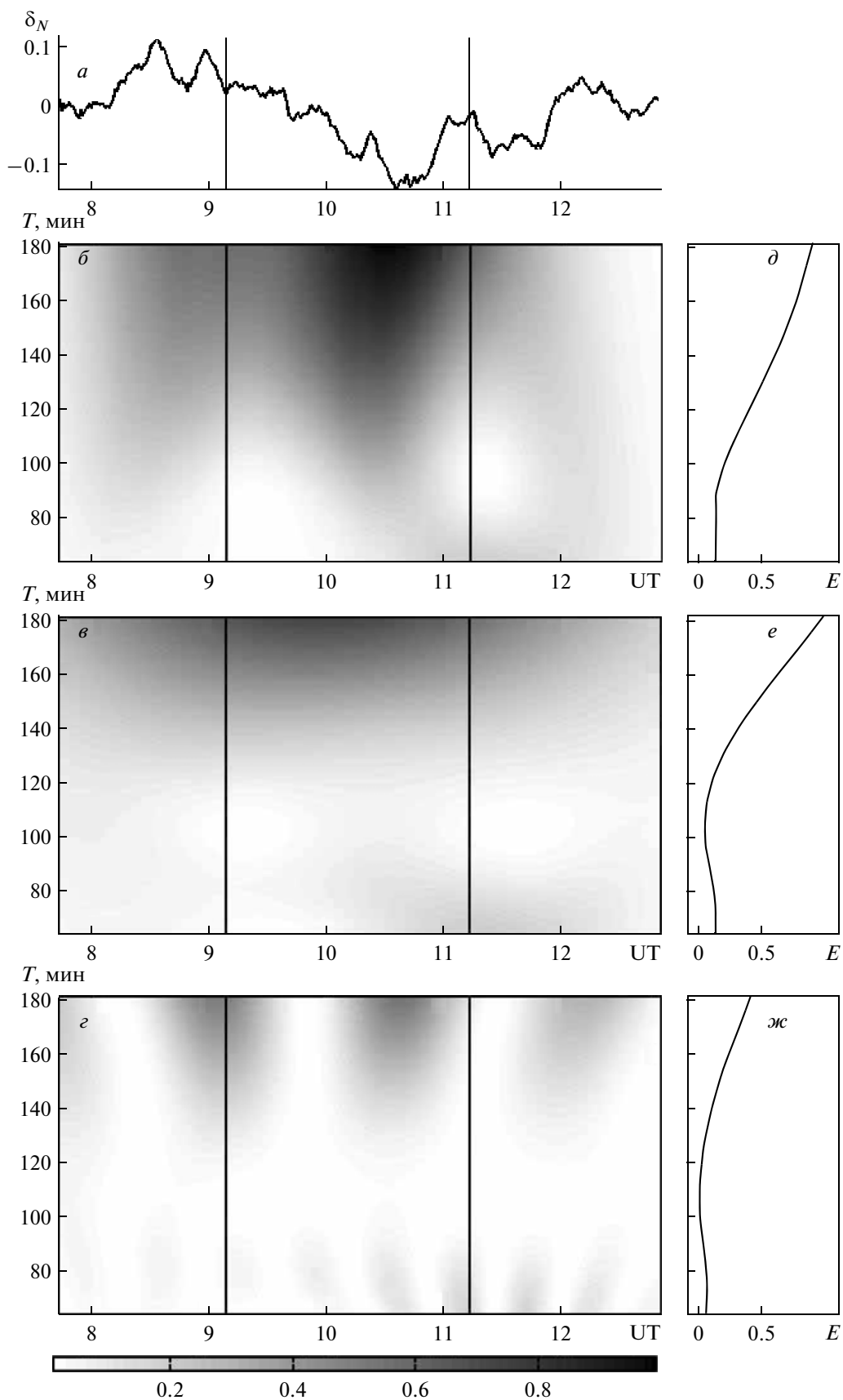


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, в диапазоне периодов 65–180 мин для 1 августа 2008 г.



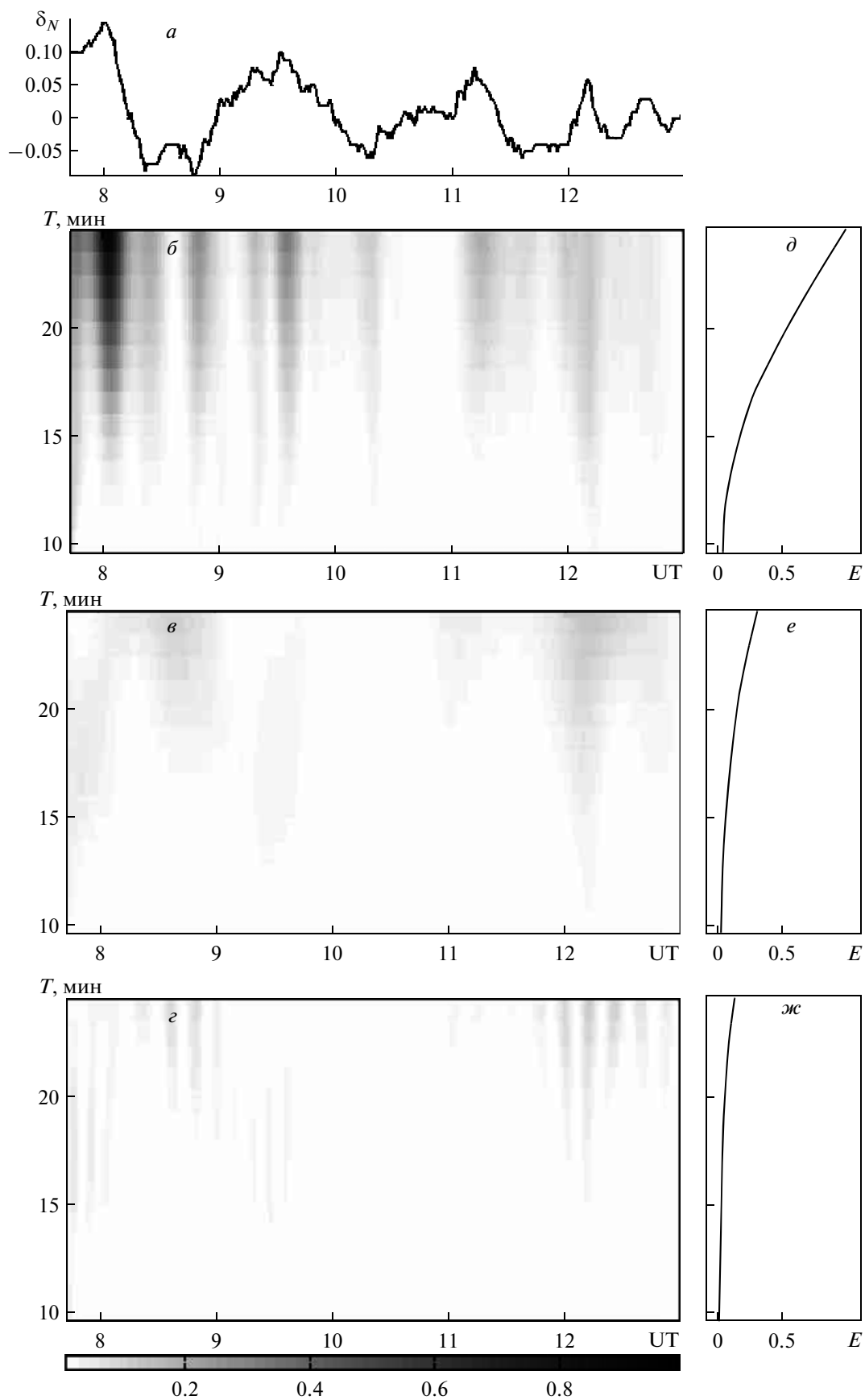


Рис. 6. То же, что и на рис. 3, в диапазоне периодов 10–25 мин для 2 августа 2008 г.

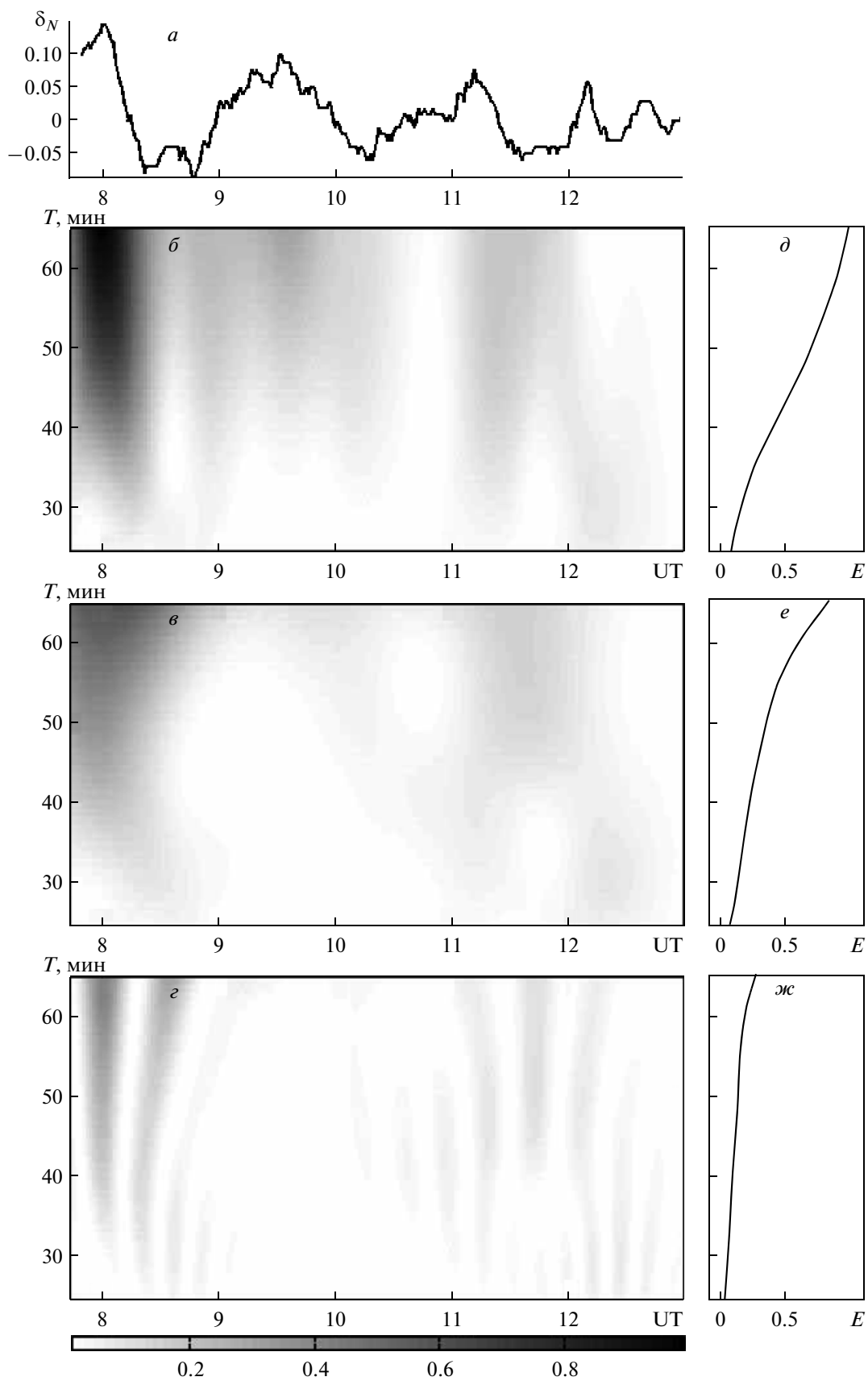


Рис. 7. То же, что и на рис. 3, в диапазоне периодов 25–65 мин для 2 августа 2008 г.

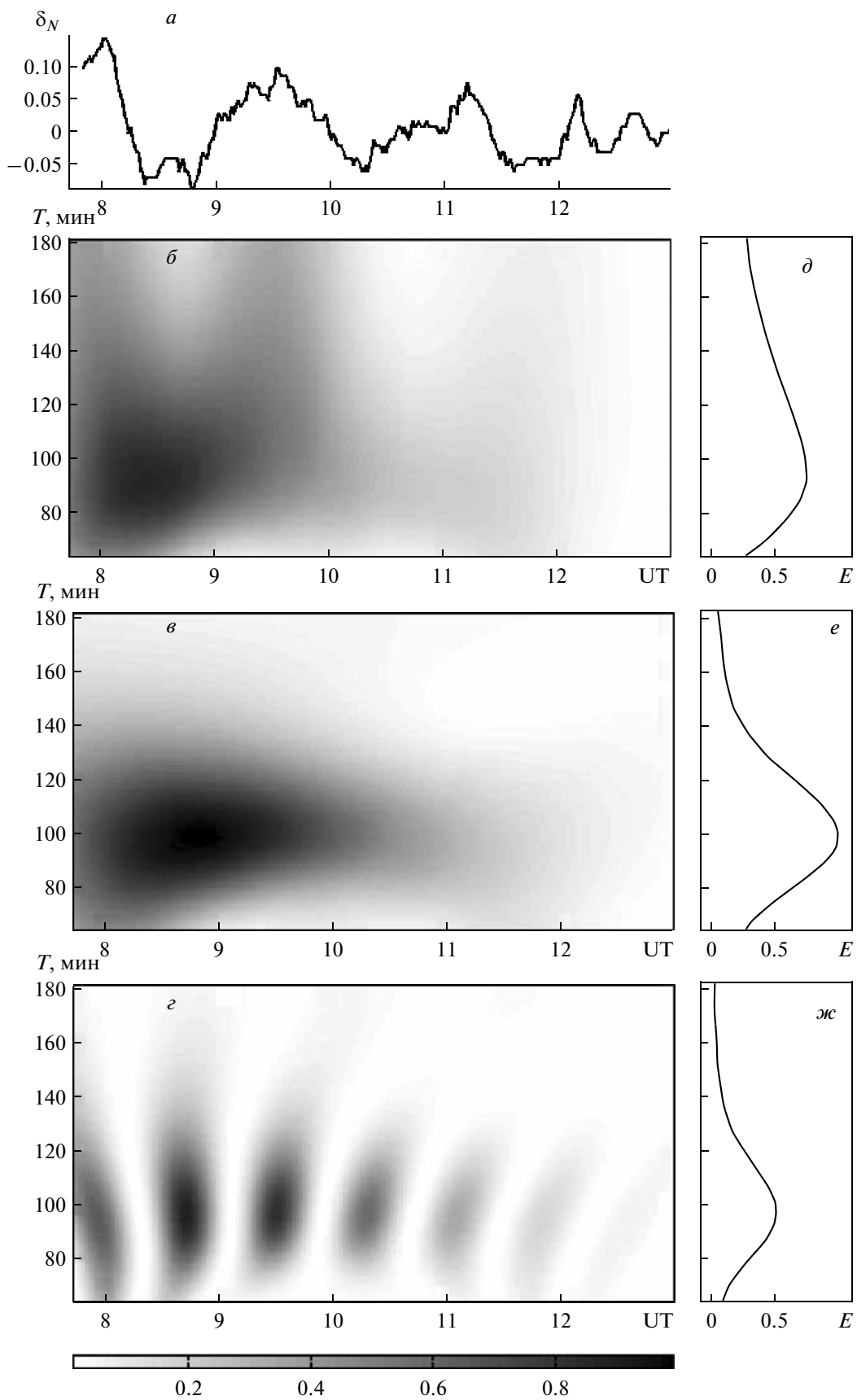


Рис. 8. То же, что и на рис. 3, в диапазоне периодов 65–180 мин для 2 августа 2008 г.

затмением, или генерацией ВВ? Поскольку измерения проводились в одном пункте, однозначно ответить на этот вопрос не легко. В пользу волновой природы возмущений свидетельствует смещение, например, минимальных значений  $\delta_q$  на высотах 125; 220 и 310 км, которые имели место соответственно в 10:30; 10:49 и 11:08. По-видимому, волна распространялась с меньших высот на большие со средней вертикальной составляющей скорости  $v_z \approx 80$  м/с. Как известно, такие значения  $v_z$  типичны для внутренних гравитационных волн [Госсард и Хук, 1978; Григорьев, 1999].

Интересно сравнить наблюдаемые эффекты 1 августа 2008 г. с эффектами других ЗС, которые опубликованы нами в работах [Бурмака и др., 2005, 2007а, б; Бурмака и Черногор, 2008].

Частное (фаза 0.78) затмение 11 августа 1999 г. так же, как и ЗС 1 августа 2008 г., произошло в середине дня [Бурмака и др., 2005]. Оно сопровождалось появлением на высотах 125–200 км глубокого минимума в зависимостях  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$ , а также изменением спектрального состава ВВ. После ЗС на всех высотах амплитуда колебаний уменьшалась в 2–3 раза. Продолжительность этого процесса составляла 5–6 ч.

Частное (фаза 0.24) ЗС 3 октября 2005 г. также имело место вблизи полудня [Бурмака и др., 2007б]. После главной фазы затмения произошел “сбой фазы” колебания, амплитуда преобладающего колебания уменьшилась в 1.5–2 раза, период стал близок к 30–60 мин. Четко наблюдались 1.5–2 колебания. Это продолжалось ~150 мин, после чего характер ВВ снова изменился. В фоновый день поведение  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$  было другим.

Частное (фаза 0.77) ЗС 29 марта 2006 г. также имело место вблизи полудня [Бурмака и др., 2007а]. На высотах больше 300 км эффекты затмения были практически незаметны. Ниже 160 км в зависимостях  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$  наблюдался только глубокий минимум. В диапазоне высот 160–300 км после окончания ЗС в течение 7 ч существовал квазипериодический процесс с амплитудой  $\Delta N_m \approx 1.7 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,  $\delta_{Nm} \approx 0.2$  и периодом ~180 мин. Этот процесс был подавлен в результате прохождения вечернего солнечного терминатора.

Добавим, что в фоновые дни (с 30 марта по 3 апреля 2006 г.) параметры ВВ существенно отличались от тех, что имели место 29 марта 2006 г.

Частное (фаза 0.74) затмение 31 мая 2003 г. наблюдалось в утреннее время (с 02:16 до 04:17 UT, или с 05:38 до 07:39 местного времени), оно началось через 1 ч после восхода Солнца [Бурмака и др., 2005]. Поэтому на эффекты ЗС наложились эффекты, связанные с движением солнечного терминатора.

В день затмения, вблизи его главной фазы, в зависимостях  $\delta_q(t)$ ,  $\Delta N(t)$  и  $\delta_N(t)$  на высотах 125–300 км проявился глубокий минимум. На высотах

300–500 км вместо него наблюдалось колебание продолжительностью в один период ( $T \approx 2$  ч). После ЗС возник хорошо выраженный квазипериодический процесс с  $\Delta N_m \approx 3 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$  (на высотах 200–350 км) и  $\delta_{Nm} \approx 0.10$ –0.15. Колебания существовали ~2–3 ч.

Таким образом, общим для всех пяти ЗС было возникновение глубокого минимума в зависимостях  $\Delta N(t)$  (или что то же самое в зависимостях  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$ ) вблизи главной фазы затмения и существенное изменение спектрального состава квазипериодических вариаций  $N$  и ее относительных значений  $\delta_N$ . Составляющие с  $T \approx 120$ –180 мин, скорее всего, отражают факт уменьшения  $N$  в течение ЗС, а составляющие с  $T \approx 20$ –120 мин – факт генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ).

## 7. ВЫВОДЫ

1. ЗС привело к существенному изменению характера зависимостей  $\delta_q(t)$  и  $\delta_N(t)$ , описывающих квазипериодические возмущения концентрации электронов, на высотах 125–510 км.

В день ЗС в этих зависимостях в период затмения наблюдается сильно выраженный провал, фактически повторяющий поведение временного хода концентрации электронов. Величина провала уменьшалась по мере роста высоты. Этому нестационарному процессу соответствовали периоды 120–180 мин.

2. Спектральный состав квазипериодических возмущений в день ЗС и фоновый день заметно отличался.

Наиболее существенные изменения спектрального состава начались примерно после наступления главной фазы затмения. На всех высотах усилились составляющие с периодами 20–25; 50–65 и 150–180 мин. Надо полагать, что первые и вторые связаны с генерацией (усилением) ВГВ.

3. В день ЗС абсолютные значения амплитуд квазипериодических возмущений концентрации электронов  $N$  в диапазоне высот 125–510 км составляли  $4 \times 10^{10}$ – $2 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$  соответственно. В фоновый день в том же диапазоне высот они не превышали  $2 \times 10^{10}$ – $10^{10} \text{ м}^{-3}$ .

4. В период ЗС относительная амплитуда квазипериодических возмущений  $N$  достигала в нижней части  $F$ -области ионосферы значений 0.10–0.15. Примерно такие же значения  $\delta_{Nm}$  имели место и в фоновый день.

5. Имеющиеся данные позволяют утверждать, что наблюдаемые квазипериодические процессы, вызваны генерацией ВГВ затмением Солнца.

6. Подтверждено, что совместное применение ОПФ, АПФ и ВП повышает эффективность спек-

трального анализа, а значит и обнаружения квазипериодических возмущений.

Авторы благодарны Л.Я. Емельянову за проведение измерений на радаре НР, а С.В. Панасенко — за предоставление в распоряжение авторов программного обеспечения для спектрального анализа данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 3. С. 38–53. 2007а.
- Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. Т. 13. № 6. С. 74–86. 2007б.
- Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 11. С. 3–24. 2007в.
- 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. 2005.
- 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, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 9. № 1. С. 5–28. 2004б.
- 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.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Григорьев Г.И. АГВ в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–10. 1999.
- Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 1. С. 119–129. 2013.
- Лазоренко О.В., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 10. № 10. С. 39–49. 2006.
- Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- Beer T., May A.N. Atmospheric gravity waves to be expected from the solar eclipse of June 30 // Nature. V. 240. № 5375. P. 30–32. 1972.
- Bertin F., Hughes K.A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. V. 39. P. 457–461. 1977.
- Broche P., Crochet M., de Maitre J.G. Gravity waves generated by the June 1973 solar eclipse in Africa // J. Atmos. Terr. Phys. V. 38. № 12. P. 1361–1364. 1976.
- Buther E.C., Downing A.M., Kole K.D. Wavelike variations in the F-region in the path of totality of the eclipse of 23 October 1976 // J. Atmos. Terr. Phys. V. 41. P. 439–444. 1979.
- Chandra H., Sethia G., Vyas G.D., Deshpande M.R., Vats H.O. Ionospheric effects of the total solar eclipse of 16 Feb. 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. V. A47. № 1. P. 57–60. 1980.
- Chimonas G., Hines C.O. Atmospheric gravity waves induced by a solar-eclipse // J. Geophys. Res. V. 75. P. 875–876. 1970.
- Davis M.J., da Rosa A.V. Possible detection of atmospheric gravity waves generated by the solar eclipse // Nature. V. 226. № 5221. P. 1123–1128. 1970.
- Deshpande M.R., Chandra H., Sethia G., Vats H.O., Vyas G.D., Iyer K.N., Janve A.V. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes // Proc. Indian. Nat. Acad. Sci. V. A48. Suppl. № 3. P. 427–433. 1982.
- Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse // J. Geophys. Res. V. 8. № 13. P. 2401–2404. 1976.
- Jones T.B., Wright D.M., Milner J., Yeoman T.K., Reid T., Senior A., Martinez P. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Solar. Terr. Phys. V. 66. № 5. P. 363–374. 2004.