

Радиофизические наблюдения волновых возмущений в ионосфере в период частного солнечного затмения 1 августа 2008 г.

В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор¹

*Институт ионосферы НАНУ и МОНУ,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: viktor_burmaka@ukr.net*

¹*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2009 г.

Анализируются квазипериодические вариации мощности некогерентно рассеянных сигналов, вызванные волновыми возмущениями в ионосфере, в день частного (фаза около 0.42) солнечного затмения и в фоновый день. Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-анализ. Показано, что в день солнечного затмения и в фоновый день спектральные характеристики волновых возмущений в диапазоне высот 100 ÷ 500 км заметно отличались. Изменения спектрального состава начинались после наступления фазы максимального покрытия диска Солнца и продолжались не менее 2 ч.

Введение

Хорошо известно, что солнечное затмение (СЗ) предоставляет исследователю уникальную возможность изучения целого комплекса физико-химических и радиофизических процессов в атмосфере и геокосмосе в условиях быстрого (характерное время $t_c \approx 1$ ч) изменения интенсивности излучения Солнца при почти постоянном его зенитном угле χ . Особенно незначительные изменения последнего имеют место вблизи местного полудня.

Первые попытки наблюдения эффектов, вызванных СЗ, были выполнены еще в 1920-е гг. К сожалению, используемые методы были крайне несовершенными и малоинформативными. В 1970-х гг. для диагностики стал применяться уже целый арсенал методов (см., например, [1, 2]).

В комплексных (оптических, радиофизических, магнитометрических) исследованиях эф-

фектов, вызванных рядом СЗ в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле, приняли участие авторы настоящей работы [3-15]. В этих работах показано, что СЗ сопровождаются сложной совокупностью физических процессов в околоземной среде. Величина эффектов зависит от фазы в цикле солнечной активности, степени покрытия диска Солнца, времени суток, состояний космической и атмосферной погоды и других факторов.

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

Авторы работы [16] впервые предсказали, что СЗ способны генерировать акустико-гравитационные волны (АГВ). Впоследствии было

предпринято немало попыток, направленных на достоверное подтверждение гипотезы [16]. Но не всем исследователям (см., например, [17-20]) удавалось уверенно зарегистрировать волны, вызванные СЗ. Попытки других (см., например, [21-26]) увенчались успехом.

Тем не менее до настоящего времени нет единого мнения о том, может ли СЗ генерировать АГВ и другие ВВ или нет. Тем более не ясно, какие параметры могут иметь эти ВВ.

Для поиска ВВ, генерируемых СЗ, нами проведен анализ результатов измерений, выполненных на харьковском радаре некогерентного рассеяния (НР). Как известно, метод НР относится к высокоинформативным и весьма точным методам диагностики физических процессов в геокосмосе.

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

Общие сведения о затмении Солнца

СЗ началось в 08:04 (здесь и далее приводится мировое время – УТ) в северной части Канады, а закончилось в 12:38 в Китае. Центральная линия затененной области пересекла Гренландию, Арктику, Новую Землю, Центральную Россию, Монголию и Китай. Ширина области полного СЗ составляла 237 км, а скорость ее движения – 900 м/с.

Частное затмение наблюдалось во всех частях Европы включая Украину.

В месте расположения Ионосферной обсерватории, вблизи г. Харьков, СЗ началось в 09:11, закончилось в 11:17. Максимальное покрытие диаметра диска Солнца составляло 0.42. Оно имело место в 10:15 (13:15 по киевскому времени, или около 13:37 местного времени).

Средства и методы

Радар НР. Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы НАН и МОН Украины (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные параметры радара следующие: час-

тота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м², коэффициент усиления антенны – около 10⁴, ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны – около 1°, 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.

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 статистического анализа сигнала. Результаты измерений были обработаны по методикам, более подробно описанным в работах [27, 28].

Перечислим основные этапы статистической обработки мощности смеси сигнала и шума P_{sn} и мощности шума P_n .

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 ΔT_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 δP_{s1} по n_2 (в этой 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 $\delta_{Nm} = \Delta N_m / N_0$ (ΔN_m – амплитудное значение ΔN):

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

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

Относительная ошибка в оценке δ_{Nm} равна [27, 28]

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

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 $\delta_{Nm}^2 n_2 \ll n_1$,

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

Полученные сглаженные значения δP_{s2} пропорциональны абсолютным значениям вариаций ΔN 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 δP_{s2} вычислялись нормированные ряды безразмерного параметра, характеризующего вариации мощности рассеянного сигнала (а значит и ΔN), $\delta_q = (\delta P_{s2} / \overline{P_n}) k$, где $\overline{P_n}$ – средний уровень шума за время наблюдения; $k = \frac{P_{\max}}{P} \frac{\tau_{p\max}}{\tau_p} \times \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}} \frac{T_{\text{сист}}}{T_{\text{сист}\max}}$ (параметры с индексом “max” обозначают максимальные из значений, полу-

ченных во всех измерительных кампаниях, без индекса – текущие значения для каждой отдельной измерительной кампании); P – импульсная мощность радиопередающего устройства; $P_{\max} = 2.2$ МВт; $\tau_{p\max} = 800$ мкс; Δf – полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства; $\Delta f_{\max} = 9.5$ кГц; $T_{\text{сист}}$ – эффективная шумовая температура системы, приведенная ко входу радиоприемного устройства; $T_{\text{сист}\max} = 1300 \div 1800$ К в зависимости от времени суток. Введение коэффициента k позволит сравнивать δ_q , полученные в разных измерительных кампаниях.

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 зависимость P_s от температур электронов T_e и ионов T_i .

Пример данных статистической обработки приведен на рис. 1. Видно, что при $q \approx 1$ значения $\tilde{\sigma}_N \approx 0.15$.

Методы спектрального анализа. Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП), более подробно описанные в [29-31].

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 ; τ – параметр, описывающий смещение оконной функции относительно сигнала вдоль временной оси; ω – круговая частота.

Зависимость плотности энергии от времени и частоты (или периода) для ОПФ называется спектрограммой,

$$P_S f(\omega, \tau) = |Sf(\omega, \tau)|^2.$$

АПФ преобразование может быть записано в виде:

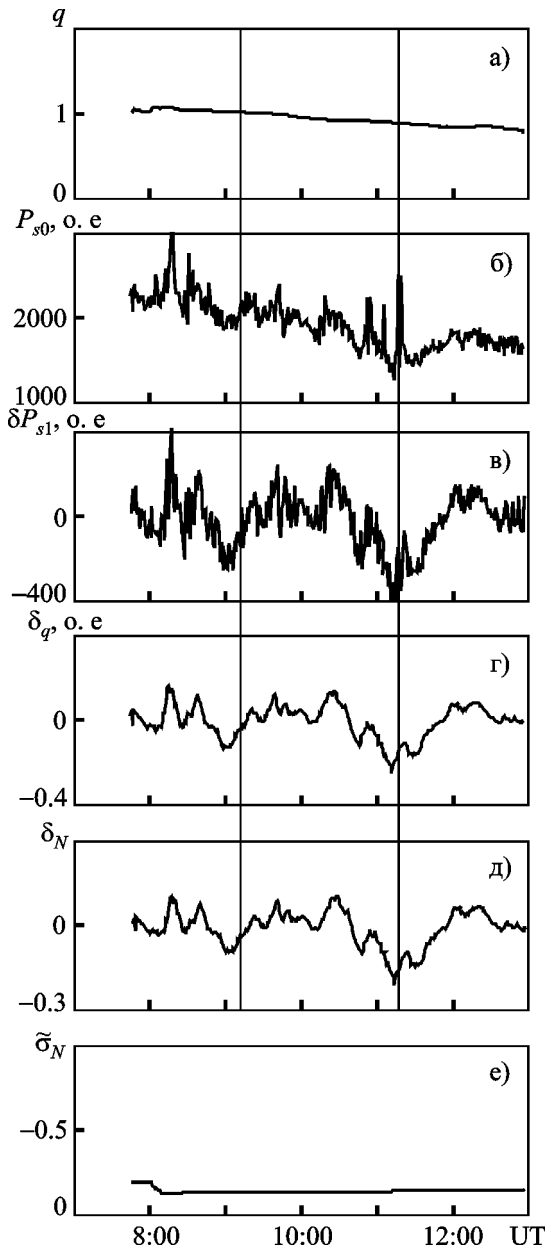


Рис. 1. Пример представления формата данных статистической обработки сигнала (1 августа 2008 г., высота 310 км): а) – временные вариации отношения сигнал/шум; б) – временные вариации одноминутных оценок некогерентно рассеянной мощности сигнала; в) – то же после удаления тренда; г) – временные вариации параметра δ_q , пропорционального возмущениям концентрации электронов; д) – временные вариации относительных возмущений концентрации электронов; е) – относительная погрешность оценки δ_N . (Вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца СЗ)

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

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

Поскольку функция спектральной плотности АПФ $A_\nu f(a, \tau)$ является комплекснозначной функцией, имеет смысл рассматривать по отдельности $|A_\nu f(a, \tau)|$ и $\arg A_\nu f(a, \tau)$, а величину

$$P_A f(a, \tau) = |A_\nu f(a, \tau)|^2$$

называть спектрограммой АПФ. Последняя представляет собой двумерную плотность энергии исследуемого сигнала $f(t)$.

Далее для ОПФ и АПФ в работе используются следующие выражения:

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

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

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 единицах.

В настоящей работе для ОПФ и АПФ в качестве $g(t)$ использовалось окно Хемминга, имеющее вид (см., например, [29]):

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

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

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

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

Здесь, как и выше, t – безразмерное время.

Вейвлет Морле удобен для анализа коротких цугов волн, которые, как правило, и наблюдаются в ионосфере.

Кроме функций $P_S(\tilde{T}, \tau)$, $P_A(\tilde{T}, \tau)$, и $P_W(\tilde{T}, \tau)$, в работе также используются энергограммы [29, 30, 32]:

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

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

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

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

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

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

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

в котором a – параметр масштабирования ($a > 0$), b – параметр сдвига.

Зависимость плотности энергии от a и b для ВП называют скэйлограммой,

$$P_W f(a, b) = |Wf(a, b)|^2.$$

Сравнение возможностей ОПФ, АПФ и ВП при оценке спектров дано в [29-31].

Состояние космической погоды

Состояние космической погоды удобно характеризовать временными вариациями плотностей потоков протонов и электронов, H_p -компоненты геомагнитного поля, а также индексов авроральной и магнитной активности (AE , K_p и D_{st}).

Опишем состояние космической погоды в период с 29 июля по 4 августа 2008 г. (рис. 2).

СЗ предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 0 до 2).

Несущественными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов изменялась по квазипериодическому закону с периодом ~ 1 суток в пределах $(2 \div 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Компонента B_z хаотически варьировалась в пределах $\pm(2 \div 3)$ нТл. Малосущественными были изменения уровня B_t (± 1 нТл). Достаточно упорядоченными (с периодом 1 сутки) были вариации H_p -компоненты геомагнитного поля (в пределах 50 нТл). Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах $\pm(3 \div 5)$ нТл. Вариации индекса AE в отдельные временные интервалы достигали 300 нТл.

Таким образом, состояние космической погоды в день СЗ 1 августа 2008 г. было спокойным. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных с затмением.

Результаты наблюдений

Временные вариации возмущений δ_q (в относительных единицах, 1 о. е. $\approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$) и их относительных значений δ_N показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Из сравнения этих рисунков видно, что 1 и 2 августа временные зависимости δ_q заметно отличались. В день СЗ 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 квазипе-

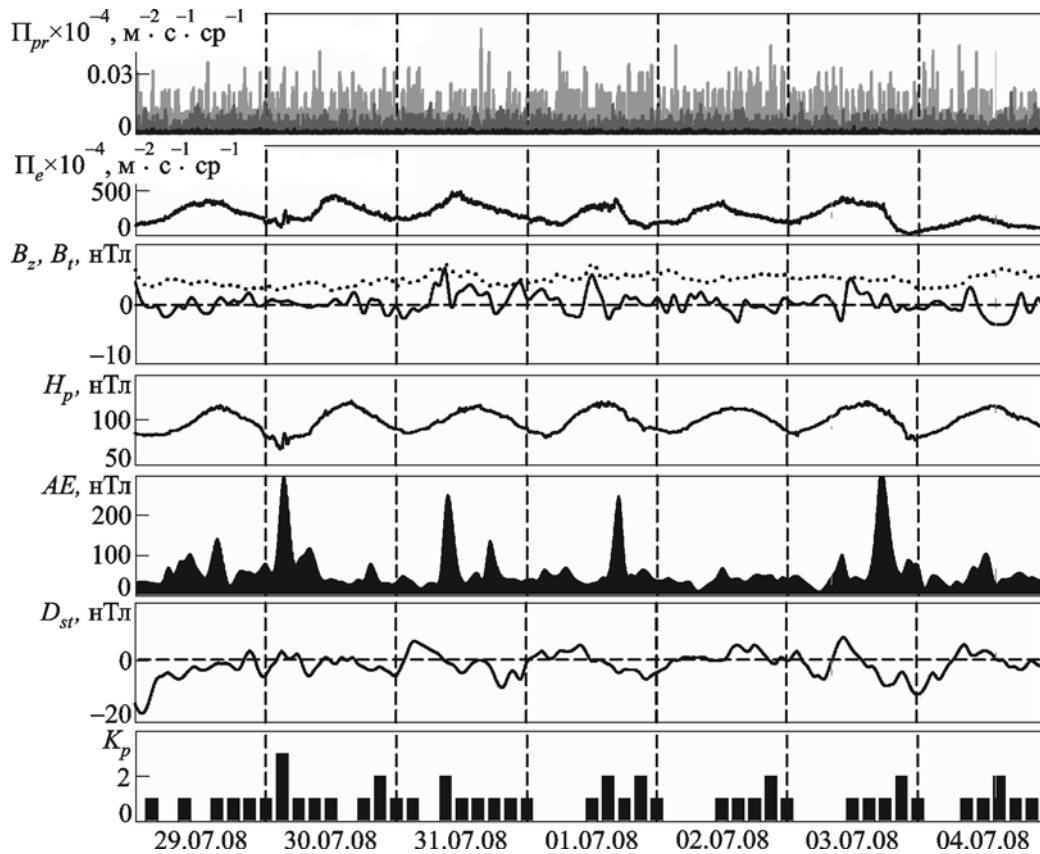


Рис. 2. Временные вариации потоков протонов Π_{pr} (космический аппарат GOES-8(W75)) и электронов Π_e (GOES-12), компоненты B_z и модуля B_t межпланетного магнитного поля (космический аппарат ACE Satellite – Magnetometer), H_p -компоненты геомагнитного поля (космический аппарат GOES-12), AE-индекса авроральной активности (World Data Center for Geomagnetism Kyoto University), D_{st} -индекса (World Data Center for Geomagnetism Kyoto University); K_p -индекса (US Air Force Weather Agency)

риодом около 70 мин. Его амплитуда δ_{qm} была наибольшей в диапазоне высот 125 ÷ 160 км. По мере увеличения высоты δ_{qm} постепенно уменьшалась: на высоте 125 км $\delta_{qm} \approx 0.4$ о. е., а на высоте около 500 км $\delta_{qm} \approx 0.02$ о. е.

В фоновый день амплитуда δ_{qm} достигала значений 0.2 о. е. в диапазоне высот 180 ÷ 220 км. На высоте ~500 км $\delta_{qm} \approx 0.1$ о. е., т. е. уменьшалась всего примерно в 2 раза.

Из рис. 3 видно, что в день СЗ амплитуда δ_{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 разрушение существовавших квазипериодических колебаний, изменение их спектрального состава.

В фоновый день временная зависимость δ_N не испытывала значительных скачков (см. рис. 4). Значения $\delta_{Nm} \approx 0.10 \div 0.15$ имели место в диапазоне высот 180 ÷ 220 км. С увеличением высоты амплитуда δ_{Nm} уменьшалась незначительно. Мало также изменялся на этих высотах спектральный состав вариаций $\delta_N(t)$.

Результаты спектрального анализа

Спектральный анализ осуществлялся в диапазоне периодов 10 ÷ 180 мин. Его результаты представлены на рис. 5, 7 и 9 для дня СЗ (вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца затмения) и на рис. 6, 8 и 10 для фонового дня.

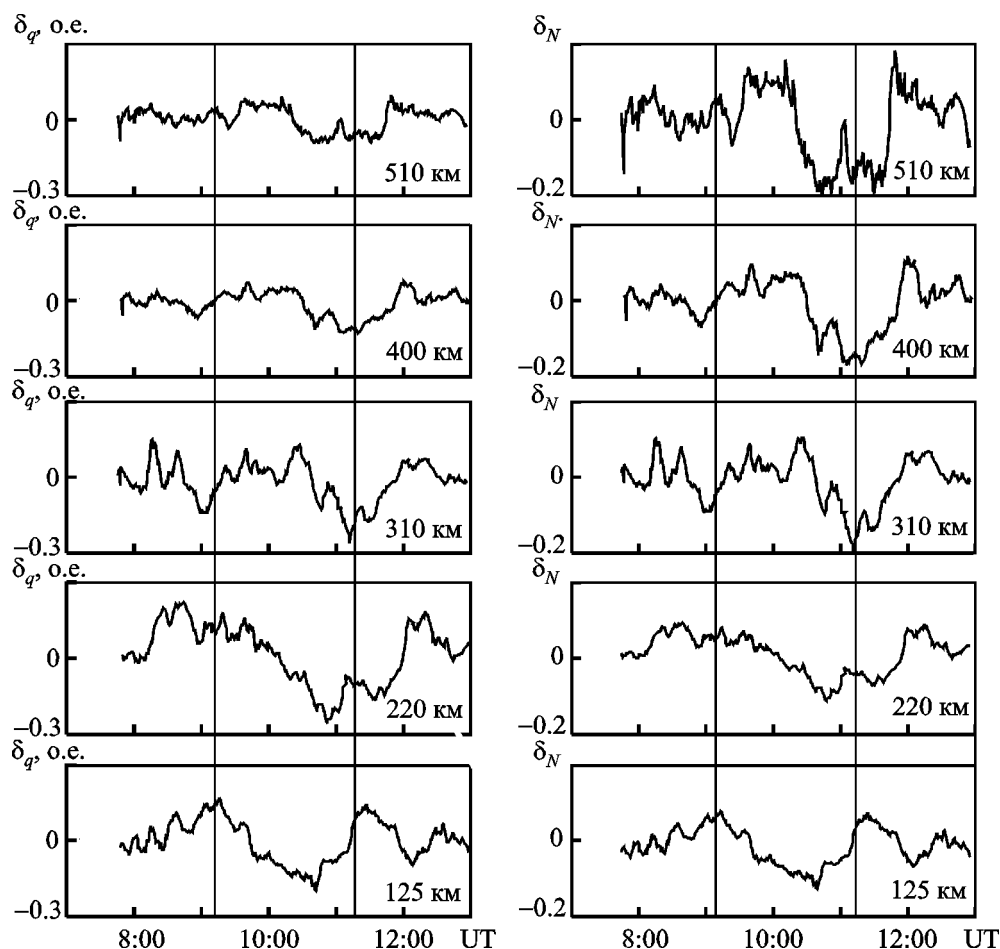


Рис. 3. Временные вариации возмущений δ_q и относительных возмущений δ_N концентрации электронов во время СЗ 1 августа 2008 г. (вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца затмения)

Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что на высоте 125 км в день СЗ в интервале времени 09:20 ÷ 10:40 преобладал процесс с периодом $T = 150$ мин. В фоновый день наблюдались квазипериодические колебания с $T \approx 80 \div 120$ мин. Максимальное значение $\delta_{Nm} \approx 0.06$ было примерно одинаковым.

ВВ на высоте 310 км в день затмения и в фоновый день отличались (рис. 7 и рис. 8). В период СЗ усилился процесс с $T \approx 120 \div 160$ мин и $\delta_{Nm} \approx 0.2$. После 10:00 хорошо наблюдались колебания с $T \approx 30 \div 40$ мин, $\delta_{Nm} \approx 0.05 \div 0.1$. Их продолжительность $\Delta T \approx 60$ мин. В фоновый день волновая активность была менее выраженной: значения δ_{Nm} составляли $0.02 \div 0.05$. Четко выделялись четыре группы периодов: около 20, 40, 70 ÷ 90 и 150 ÷ 200 мин.

Существенно также отличались 1 и 2 августа ВВ на высоте 510 км (рис. 9 и рис. 10). В день СЗ усилились процессы с периодами 130 ÷ 160 мин ($\delta_{Nm} \approx 0.15$), 40 ÷ 60 мин ($\delta_{Nm} \approx 0.1$) и 25 мин ($\delta_{Nm} \approx 0.05$). В фоновый день наблюдались три группы периодов: 20, 80 ÷ 110 и 150 ÷ 200 мин. Все три квазипериодических процесса имели примерно равные амплитуды: $\delta_{Nm} \approx 0.06 \div 0.10$.

Обсуждение

Выше показано, что временные зависимости $\delta_q(t)$ и $\delta_N(t)$ в день СЗ и в фоновый день заметно отличались. Различались и спектры этих процессов. Главное отличие в зависимостях $\delta_q(t)$ и $\delta_N(t)$ заключалось в появ-

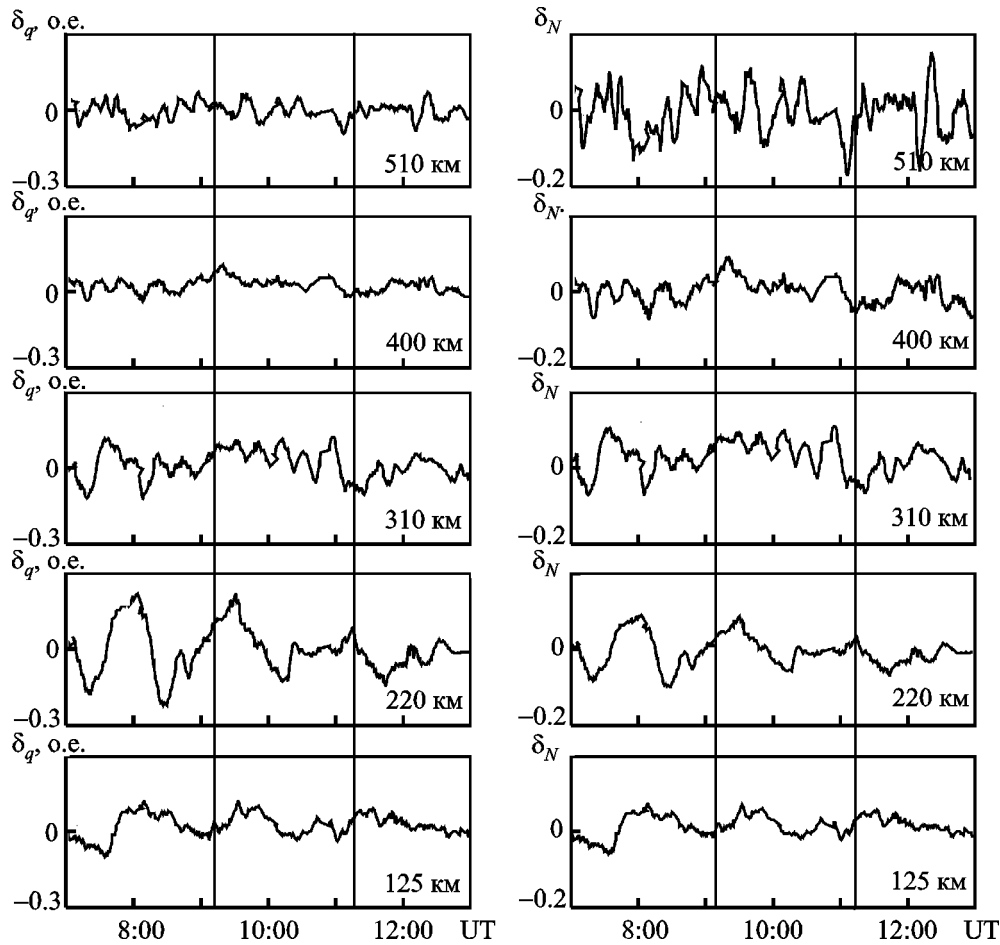


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для фонового дня 2 августа 2008 г.

лении 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 усиливались составляющие с периодами $T \approx 60 \div 120$ мин. Спектральные составляющие с $T \approx 20 \div 40$ мин в ходе затмения также изменялись. Важно, что поведение спектральных компонент с такими же периодами в фоновый день было другим.

Таким образом, не вызывает сомнений тот факт, что в процессе СЗ происходило изменение спектрального состава возмущений в ионосфере. Возникает вопрос: это изменение вызвано нестационарными процессами, стимулированными 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 δ_q на высотах 125, 220 и 310 км, которое имело 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 [32, 33].

Интересно сравнить наблюдаемые эффекты 1 августа 2008 г. с эффектами, вызванными другими СЗ, которые исследованы нами в работах [10, 12, 34, 35].

Частное (0.78) затмение 11 августа 1999 г., как и СЗ 1 августа 2008 г., произошло в середине дня [34]. Оно сопровождалось появле-

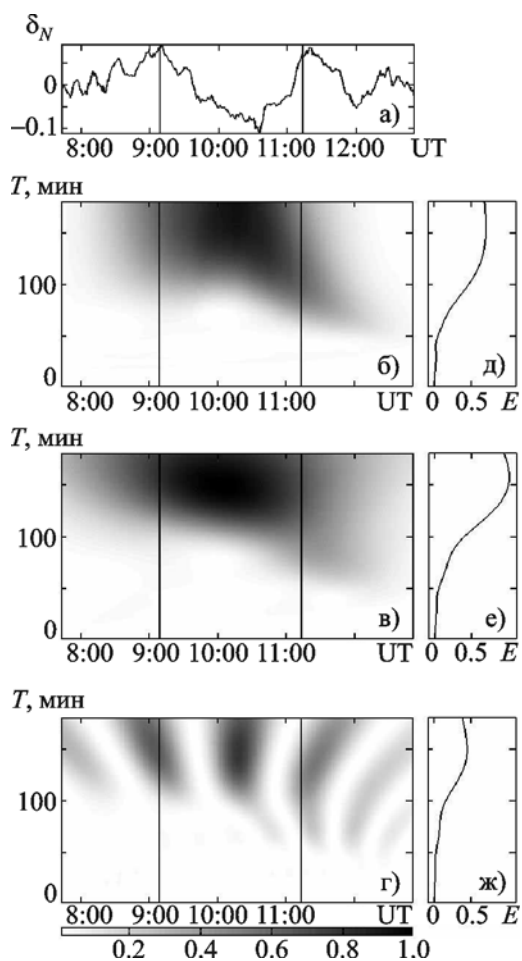


Рис. 5. Результаты спектрального анализа временных вариаций $\delta_N(t)$ 1 августа 2008 г. для высоты $z = 125$ км: а) – сигнал; б), в), г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП сигнала; д), е), ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП сигнала

нием на высотах $125 \div 200$ км глубокого минимума в зависимостях $\delta_q(t)$ и $\delta_N(t)$, а также изменением спектрального состава ВВ. После СЗ на всех высотах амплитуда колебаний уменьшалась в $2 \div 3$ раза. Продолжительность этого процесса составляла $5 \div 6$ ч.

Частное (0.24) СЗ 3 октября 2005 г. также имело место вблизи полудня [12]. После главной фазы затмения произошел “сбой фазы”

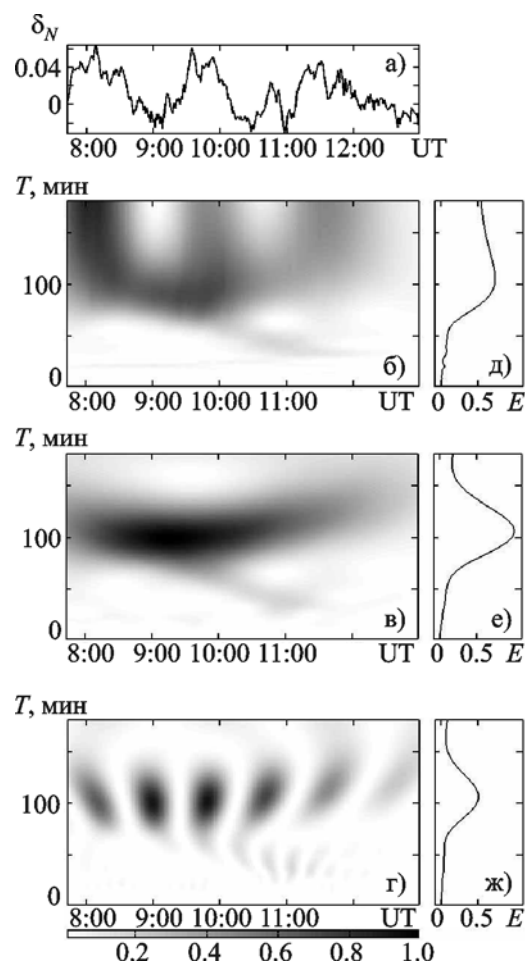


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для 2 августа 2008 г., $z = 125$ км

колебания, амплитуда преобладающего колебания уменьшилась в $1.5 \div 2$ раза, период стал близок к $30 \div 60$ мин. Четко наблюдались $1.5 \div 2$ колебания. Это продолжалось около 150 мин, после чего характер ВВ снова изменился. В фоновый день поведение $\delta_q(t)$ и $\delta_N(t)$ было другим.

Частное (0.77) СЗ 29 марта 2006 г. тоже имело место вблизи полудня [35]. 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 $160 \div 300$ км после окончания СЗ в течение 7 ч существовал квазипериодический процесс с амплиту-

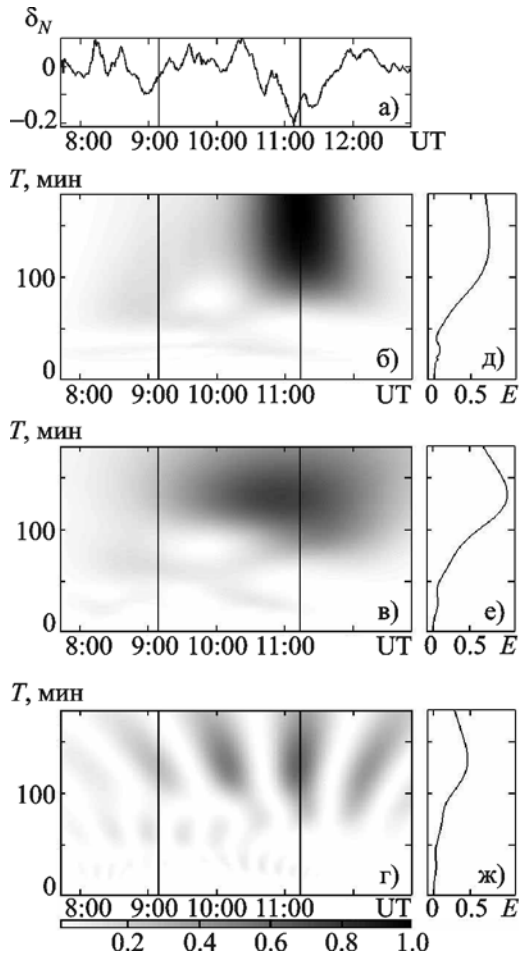


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для 1 августа 2008 г., $z = 310$ км

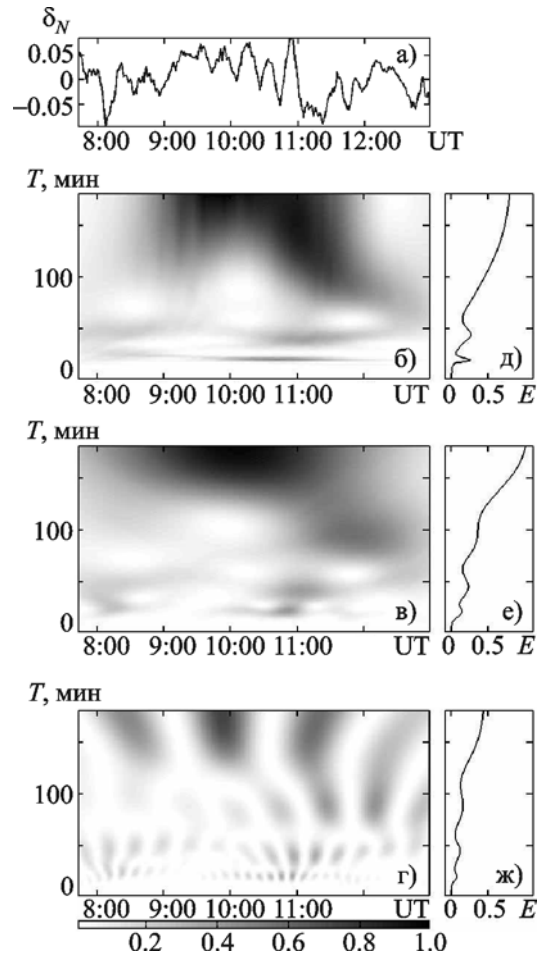


Рис. 8. То же, что на рис. 5, для 2 августа 2008 г., $z = 310$ км

дой $\Delta N_m \approx 1.7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $\delta_{Nm} \approx 0.2$ и периодом около 180 мин. Этот процесс был разрушен заходом Солнца.

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 (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 [34]. Поэтому на эффекты СЗ 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 высо-

тах 125 ÷ 300 км проявился глубокий минимум. На высотах 300 ÷ 500 км вместо него наблюдалось колебание с одним периодом ($T \approx 2$ ч). После СЗ возник хорошо выраженный квазипериодический процесс с $\Delta N_m \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (на высотах 200 ÷ 350 км) и $\delta_{Nm} \approx 0.10 \div 0.15$. Колебания существовали около 2 ÷ 3 ч.

Таким образом, общим для всех пяти СЗ 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 δ_N .

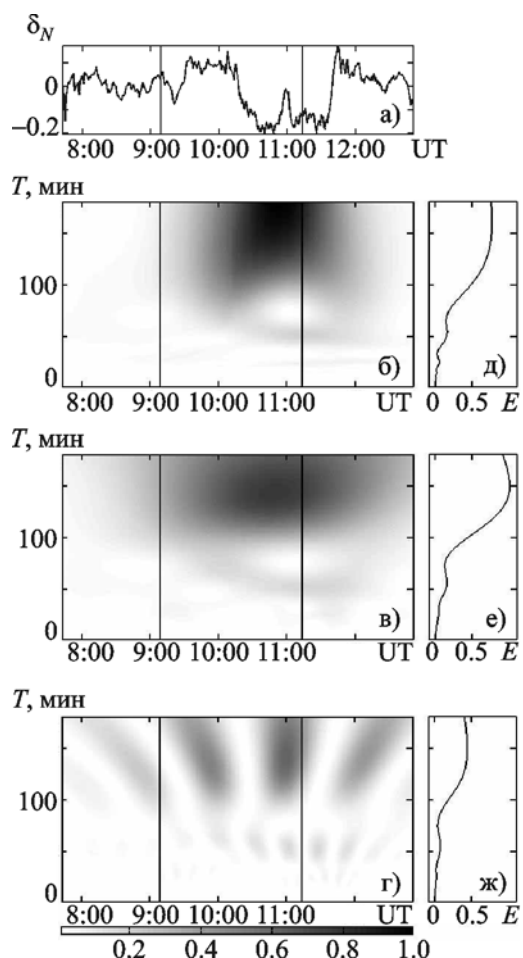


Рис. 9. То же, что на рис. 5, для 1 августа 2008 г., $z = 510$ км

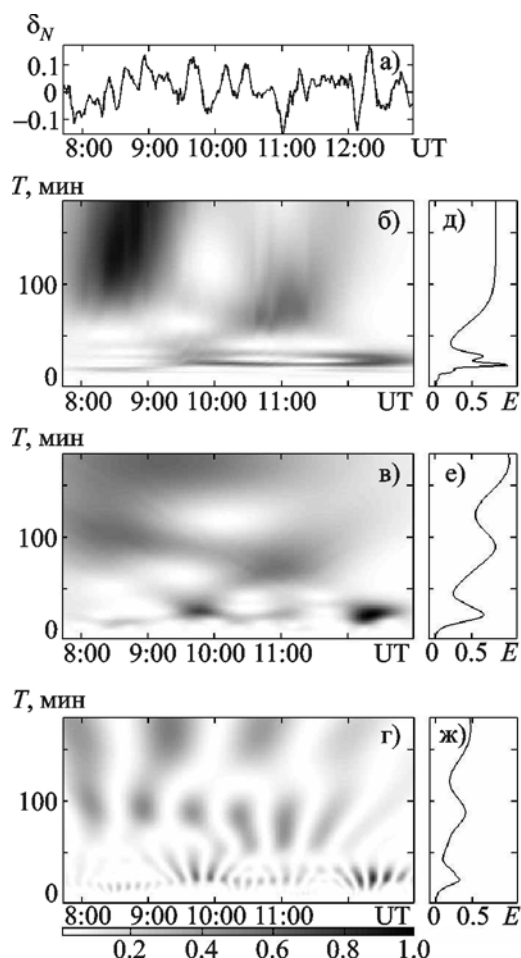


Рис. 10. То же, что на рис. 5, для 2 августа 2008 г., $z = 510$ км

Выводы

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

В день СЗ в этих зависимостях в период затмения наблюдается сильно выраженный провал, фактически повторяющий поведение временного хода концентрации электронов. Величина провала уменьшалась по мере роста высоты.

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

Наиболее существенные изменения спектрального состава начались примерно после наступления главной фазы затмения. На всех высотах усилились составляющие с периодом $60 \div 120$ мин.

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

4. В период СЗ относительная амплитуда квазипериодических возмущений N достигала в нижней части F-области ионосферы значе-

ний $0.10 \div 0.15$. Примерно такие же значения имели место и в фоновый день.

5. Полученные данные позволяют утверждать, что наблюдаемые квазипериодические процессы, скорее всего, вызваны генерацией волн затмением Солнца.

6. Подтверждено, что совместное применение ОПФ, АПФ и ВП повышает эффективность спектрального анализа квазипериодических возмущений в геокосмосе.

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

Литература

- Eclipse Supplement. – Nature. – 1970. – Vol. 226. – P. 1097-1155.
- Special Eclipse Issue (The Eclipse of 7 March 1970). – J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – Vol. 34. – P. 559-739.
- Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдений процессов в нижней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 348-360.
- Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 361-370.
- Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированные затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 361-375.
- Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тьрнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – №2. – С. 25-63.
- Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, №1. – С. 12-25.
- Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №3. – С. 55-70.
- Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, №4. – С. 526-551.
- 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 современной радиоэлектроники. – 2007. – №3. – С. 38-53.
- Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, №3. – С. 350-364.
- 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. – 2007. – Т. 13, №6. – С. 74-86.
- Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, №1. – С. 57-64.
- Акимов А. Л., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, №2. – С. 117-134.
- Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, №4. – С. 467-482.
- Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric gravity waves induced by a solar-eclipse // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75. – P. 875-876.
- Beer T., May A. N. Atmospheric gravity waves to be expected from the solar eclipse of June 30 // Nature. – 1972. – Vol. 240, No. 5375. – P. 30-32.
- 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. – 1980. – Vol. A47, No. 1. – P. 57-60.
- 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. – 1982. – Vol. A48, No. 3. – P. 427-433.
- Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., Niranjan K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. – 1982. – Vol. 48, No. 3. – P. 434-438.

21. Davis M. J., da Rosa A. V. Possible detection of atmospheric gravity waves generated by the solar eclipse // *Nature*. – 1970. – Vol. 226, No. 5221. – P. 1123-1128.
22. Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958 solar eclipse // *J. Geophys. Res.* – 1976. – Vol. 8, No. 13. – P. 2401-2404.
23. Broche P., Crochet M., de Maitre J. G. Gravity waves generated by the June 1973 solar eclipse in Africa // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1976. – Vol. 38, No. 12. – P. 1361-1364.
24. Bertin F., Hughes K.A., Kersley L. Atmospheric waves induced by solar eclipse of 30 June 1973 // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1977. – Vol. 39, No. 3. – P. 457-461.
25. 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.* – 1979. – Vol. 41, No. 5. – P. 439-444.
26. 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. Sol.-Terr. Phys.* – 2004. – Vol. 66, No. 5. – P. 363-374.
27. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // *Геомagnetизм и аэрoномия*. – 2004. – Т. 44, №4. – С. 518-534.
28. 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*. – 2004. – Т. 9, №1. – С. 5-28.
29. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2006. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
30. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2007. – №11. – С. 3-24.
31. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // *Геомagnetизм и аэрoномия*. – 2008. – Т. 48, №5. – С. 681-702.
32. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
33. Григорьев Г. И. АГВ в атмосфере Земли (обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3-10.
34. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 3. – С. 4-35.
35. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // *Космічна наука і технологія*. – 2008. – Т. 14, №4. – С. 82-91.

Радіофізичні спостереження хвильових збурень в іоносфері під час часткового сонячного затемнення 1 серпня 2008 р.

В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор

Аналізуються квазіперіодичні варіації потужності некогерентно розсіяних сигналів, викликаних хвильовими збурюваннями в іоносфері, у день часткового (фаза близько 0.42) сонячного затемнення та у фоновий день. Для спектрального аналізу використовувалися віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-аналіз. Показано, що в день сонячного затемнення та у фоновий день спектральні характеристики хвильових збурень у діапазоні висот 100 ÷ 500 км помітно відрізнялися. Зміни спектрального складу починалися з настанням фази максимального покриття диска Сонця і тривали щонайменш 2 г.

Wave Disturbance Radio Observations in the Ionosphere Associated with the August 1, 2008 Partial Eclipse

V. P. Burmaka and L. F. Chernogor

Quasi-periodic variations in the power of incoherently scattered signals generated by wave disturbances in the ionosphere are analyzed on a reference day and on the day of a partial eclipse that provided approximately 0.42 coverage. The spectral analysis techniques employed the window Fourier transform, the adaptive Fourier transform, and the wavelet transform. The spectral characteristics within the 100 ÷ 500 km altitude on the day of eclipse and on the reference day are shown to differ appreciably. The spectral content starts to change at the beginning of the phase of maximum coverage and lasts for at least for 2 hours.