

УДК 550.388

## ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. 2. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

© 2012 г. Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина Украина, г. Харьков  
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 30.05.2009 г.  
После доработки 05.03.2011 г.

Изложены результаты спектрального анализа временных вариаций доплеровского смещения частоты, сопровождавших солнечные затмения в 1999–2008 гг., расчетов и оценок возмущений параметров сигнала. Из данных наблюдений оценены параметры ионосферы и ее неоднородной структуры. Результаты расчетов соответствуют результатам наблюдений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В части 1 работы автора [Черногор, 2012] изложены общие сведения о частных солнечных затмениях (СЗ), имевших место вблизи г. Харькова в 1999–2008 гг., и результаты доплеровских наблюдений ионосферных эффектов затмений.

Целью настоящей работы является описание результатов спектрального анализа временных вариаций доплеровского смещения частоты (ДСЧ), расчетов и оценок сопутствующих затмениям ионосферных эффектов, а также обсуждение сопровождающих СЗ процессов в околоземной среде.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) подробно описанные в работе [Черногор, 2008].

Из временных зависимостей ДСЧ предварительно удалялся тренд, получаемый скользящим усреднением на интервалах времени  $T_i$ , равных 20, 60 и 120 мин. Этим обеспечивалось уверенное выделение колебаний с периодами 2–15; 5–60 и 20–120 мин, амплитуды которых заметно отличались.

Учитывая, что волновые процессы с периодом  $T > 5–10$  мин относятся к хорошо изученным внутренним гравитационным волнам, основное внимание уделим поиску волновых возмущений с малыми периодами (2–15 мин). Для этого приведем результаты спектрального анализа, полученные для  $T_i = 20$  мин (рис. 1–5).

Результаты спектрального анализа опишем отдельно для каждого затмения:

**СЗ 11 августа 1999 г.** До затмения в ионосфере наблюдался слабо выраженный квазипериодический процесс с периодами ~2, 7–15, 20 и 35–40 мин (см. рис. 1).

Примерно после наступления главной фазы затмения в ионосфере появились волновые возмущения (ВВ) с периодами 10–20 мин. Широкополосный процесс с  $T \approx 60–140$  мин также был выражен вблизи главной фазы. Их времена существования составили ~40–50 и 100–120 мин соответственно.

**СЗ 31 мая 2003 г.** До начала затмения наблюдались слабо выраженные квазипериодические процессы с периодами ~15 и 30 мин.

Почти сразу после начала СЗ возникло квазипериодическое колебание с  $T \approx 10–20$  мин, его продолжительность была ~20 мин. Интересно, что в интервале времени 02:15–02:25 наблюдался квазипериодический процесс с  $T \approx 4–6$  мин, а ДСЧ составляло 0.2–0.3 Гц (см. рис. 2). Вблизи момента главной фазы затмения имел место широкополосный процесс с  $T \approx 25–50$  мин. Его продолжительность была ~30–50 мин. После этого момента усилилось колебание с  $T \approx 10$  мин, продолжительность его существования составила ~20 мин.

**СЗ 3 октября 2003 г.** До затмения наблюдались волновые возмущения (ВВ) с  $T \approx 10–20$  мин. Их продолжительность не превышала 30 мин.

После начала СЗ в ионосфере усилились колебания с периодами 2, 5–8; 15–22 и 35–55 мин (см. рис. 3). Продолжительность существования этих колебаний равнялась ~2–3; 20; 40 и 80–90 мин соответственно. Наибольшую амплитуду имело длительнопериодическое колебание.

По окончании СЗ характер ВВ изменился: в ионосфере стали преобладать процессы с периодами 8–12; 15–30; 30–40 и 65–120 мин. Эти про-

цессы продолжались ~30; 30–40; 90 и 250 мин соответственно.

**СЗ 29 марта 2006 г.** Как показали измерения на частоте 2.7 МГц, до наступления затмения в  $E$ -области ионосферы наблюдались слабые квазипериодические процессы с периодами ~2 и 6–7 мин и длительностями ~3–4 и 20 мин соответственно (см. рис. 4).

Вблизи главной фазы СЗ имели место процессы периодами ~2, 6–7; 10–15; 35–50 и 80–150 мин. Их продолжительности составляли ~5; 15; 20–25; 50–60 и 200–300 мин соответственно.

Примерно через 1 ч после окончания затмения в спектре преобладали составляющие с периодами 10–20 мин. Продолжительность колебательного процесса была 100–110 мин.

Измерения на частоте 4.0 МГц свидетельствуют о том, что до затмения в  $F$ -области ионосферы эпизодически появлялся квазипериодический процесс с  $T \approx 10$ –15 мин, его продолжительность не превышала 20 мин.

Вблизи главной фазы СЗ имели место процессы с периодами ~2; 10–15; 20–30 мин и широкополосное колебание с  $T \approx 100$ –150 мин. Продолжительность этих процессов была ~3–4; 20–25; 60 и 200–300 мин соответственно.

**СЗ 1 августа 2008 г.** Одной из особенностей данного затмения было эпизодическое появление слоя  $E_s$ , заметно экранирующего  $E$ - и  $F$ -области ионосферы. ДС при этом становились диффузными. Для анализа временных вариаций ДСЧ предварительно определялись ежеминутные значения спектральных составляющих с наибольшей амплитудой (рис. 5, верхняя панель).

Из рисунка 5 видно, что примерно после 09:40–09:45 в ионосфере возник широкополосный процесс, в котором преобладало колебание с периодом ~10 мин. Примерно в это же время наблюдалось и колебание с  $T \approx 3$ –4 мин, но его амплитуда была существенно меньше.

Вскоре после начала затмения появился также достаточно сильно выраженный процесс с  $T \approx 20$  мин, он существовал в течение 20–30 мин. Кроме этих колебаний, имел место широкополосный процесс с  $T \approx 60$ –100 мин. Энергии всех трех процессов были сопоставимы (см. рис. 5).

Проведенный спектральный анализ показал, что ОПФ обладает лучшей локализацией по времени, а АПФ — по периодам. ВП сочетает в себе

возможности ОПФ и АПФ. Поэтому их совместное применение, как утверждалось в работе [Черногор, 2008], является целесообразным.

Сводные данные о параметрах зондирующего сигнала и ионосферных эффектах приведены в табл. 1.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

**3.1. Основные соотношения.** Для отражающейся от ионосферы радиоволны с частотой  $f \approx 3$ –5 МГц уровень амплитуды обыкновенной компоненты существенно превышает уровень амплитуды необыкновенной компоненты. Для первой из них условие отражения имеет вид

$$f = f_{pr}, \quad (1)$$

где  $f_{pr} = f_p(z_r)$  — плазменная частота на высоте отражения  $z_r$ . Основной вклад в ДСЧ дает область высот, прилегающая к высоте отражения радиоволны, где показатель преломления радиоволны  $n$  заметно отличается от единицы.

Условие (1) совпадает с условием отражения радиоволны от негиротропной ионосферы. Это позволяет в первом приближении не учитывать наличие магнитного поля. На высотах  $z \geq 100$  км также можно пренебречь влиянием соударений электронов с тяжелыми частицами. При этом

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}. \quad (2)$$

Выражение для ДСЧ имеет вид (см., например, [Намазов и др., 1975]):

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_0^{z_r} n dz, \quad (3)$$

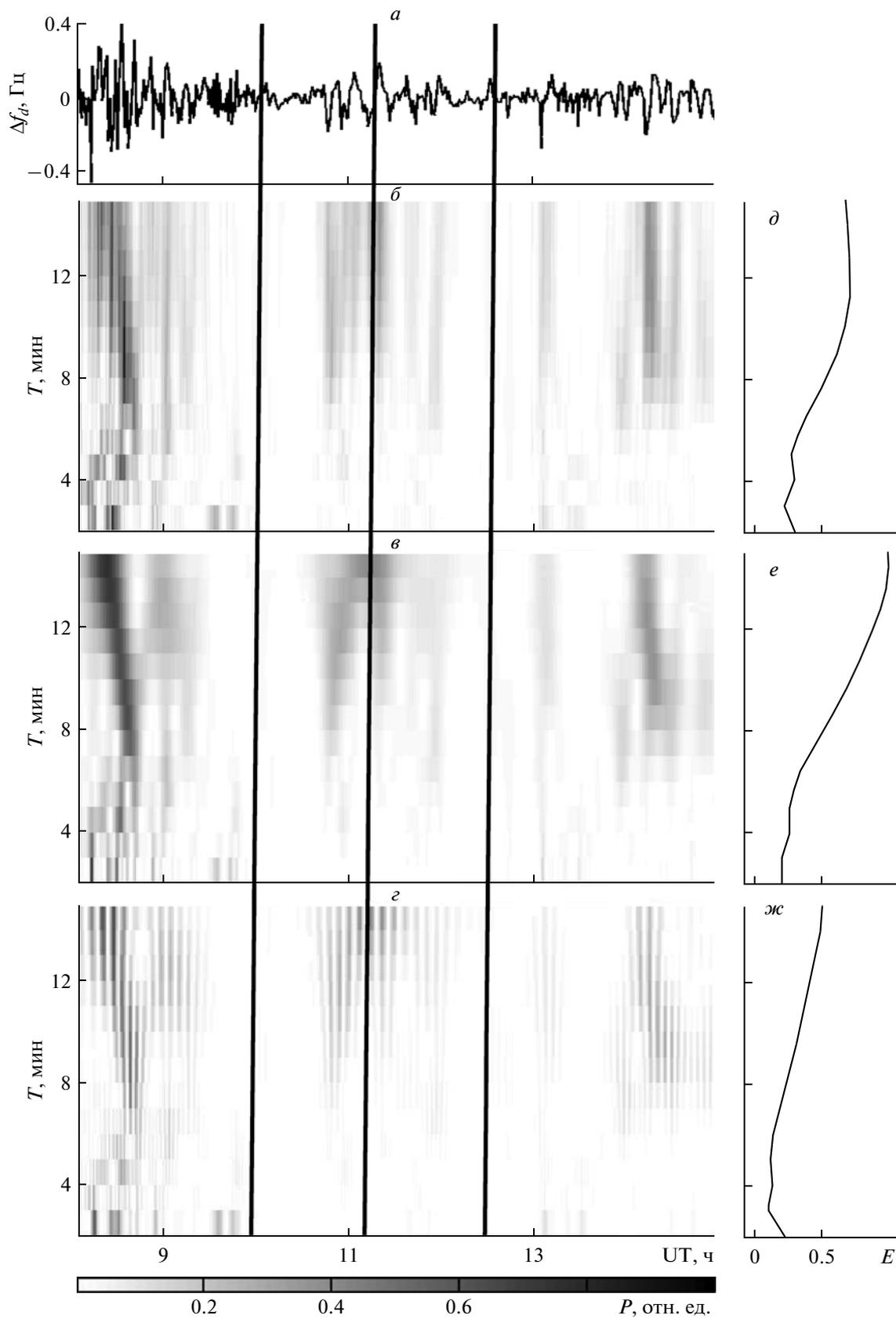
где  $z_r$  и  $n$  в общем случае зависят от времени. При движении области отражения со скоростью  $v$  и  $\partial n / \partial t = 0$  вклад в ДСЧ дает  $dz_r / dt = v$ . При этом из выражения (3) следует, что [Намазов и др., 1975]

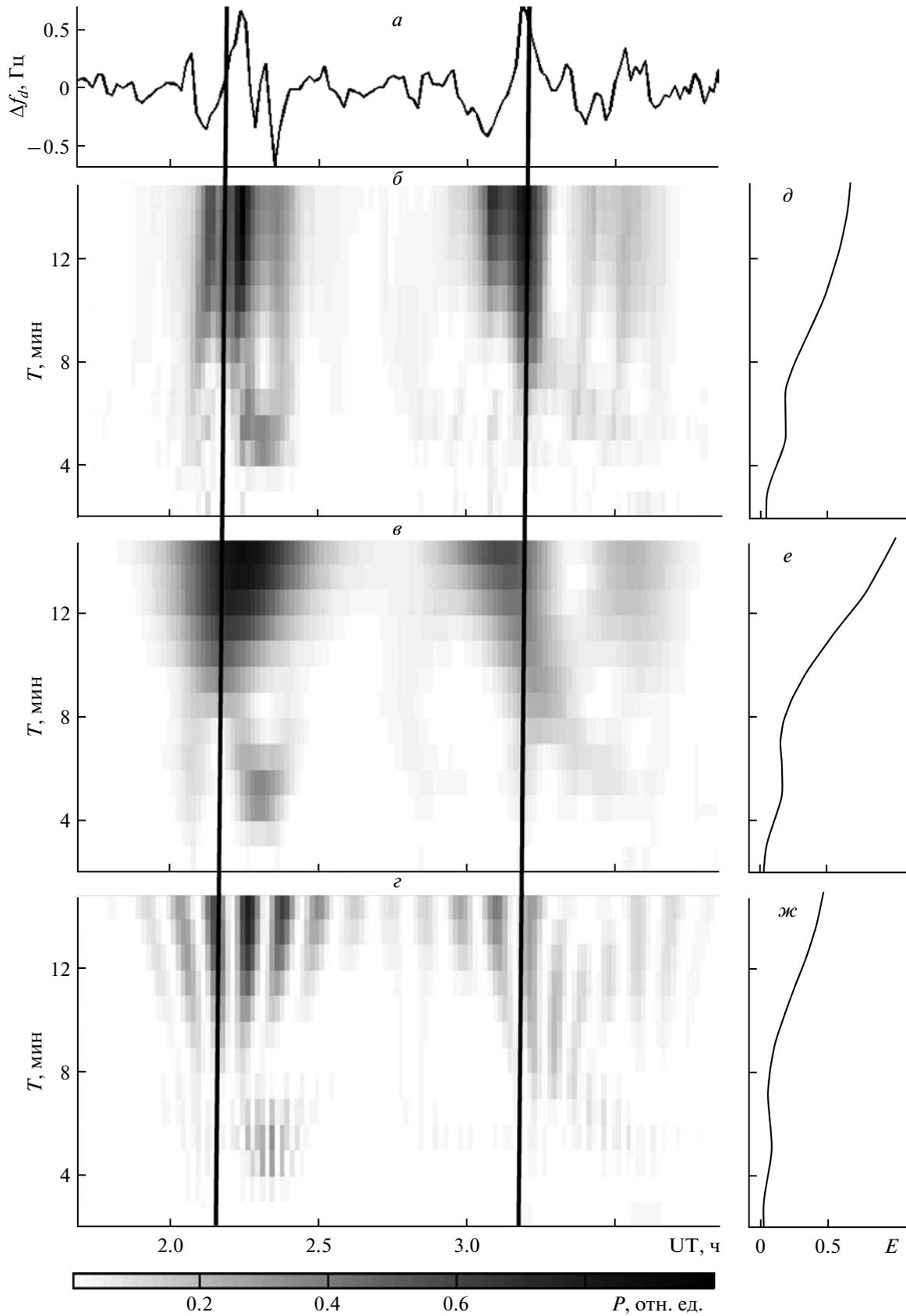
$$f_d = -2f \frac{v}{c}. \quad (4)$$

Если же  $dz_r / dt = 0$ , а  $n$  изменяется во времени [Намазов и др., 1975],

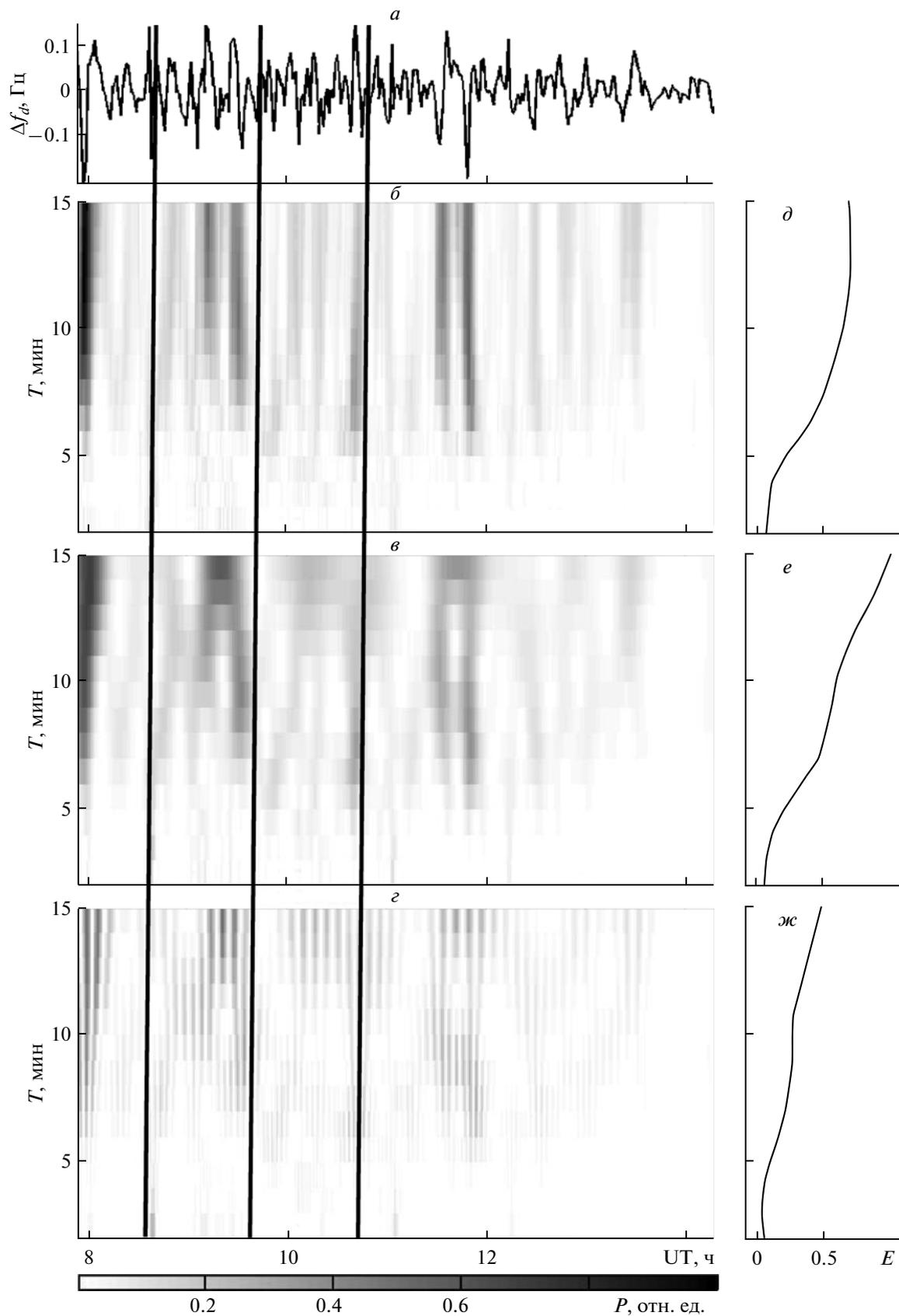
$$f_d = -2 \frac{f}{c} \int_0^{z_r} \frac{\partial n}{\partial t} dz. \quad (5)$$

**Рис. 1.** Результаты спектрального анализа временных вариаций ДСЧ 11 августа 1999 г.  $a$  — вариации ДСЧ после удаления тренда, вычисленного на интервале времени 20 мин;  $b, в, г$  — спектрограммы (в относительных единицах) соответственно оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сигнала;  $d, е, ж$  — энергограммы (в относительных единицах) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сигнала. Частота радиоволны — 3.5 МГц, диапазон действующих высот — 75–150 км. Вертикальными линиями показаны моменты начала, главной фазы и окончания СЗ.

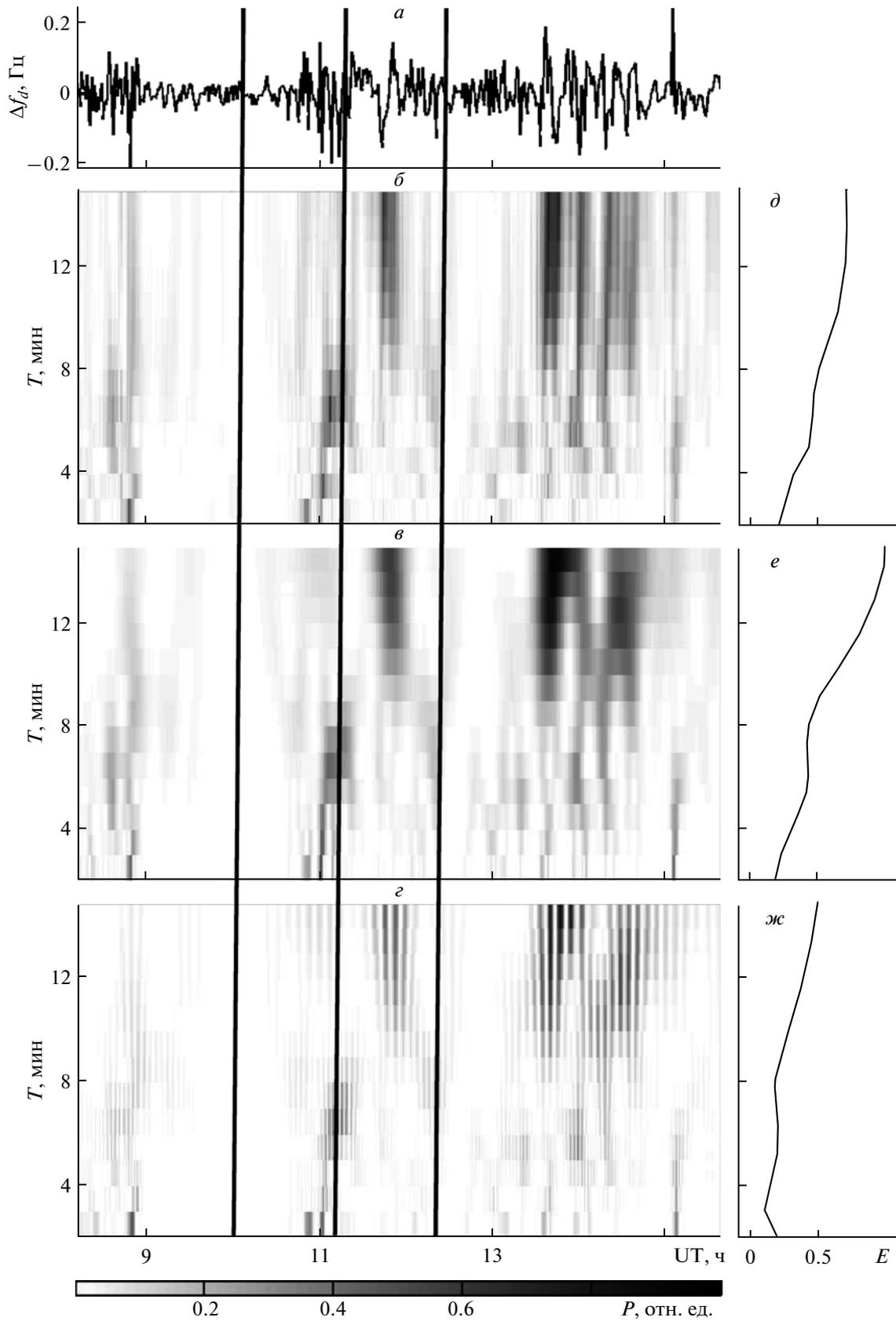




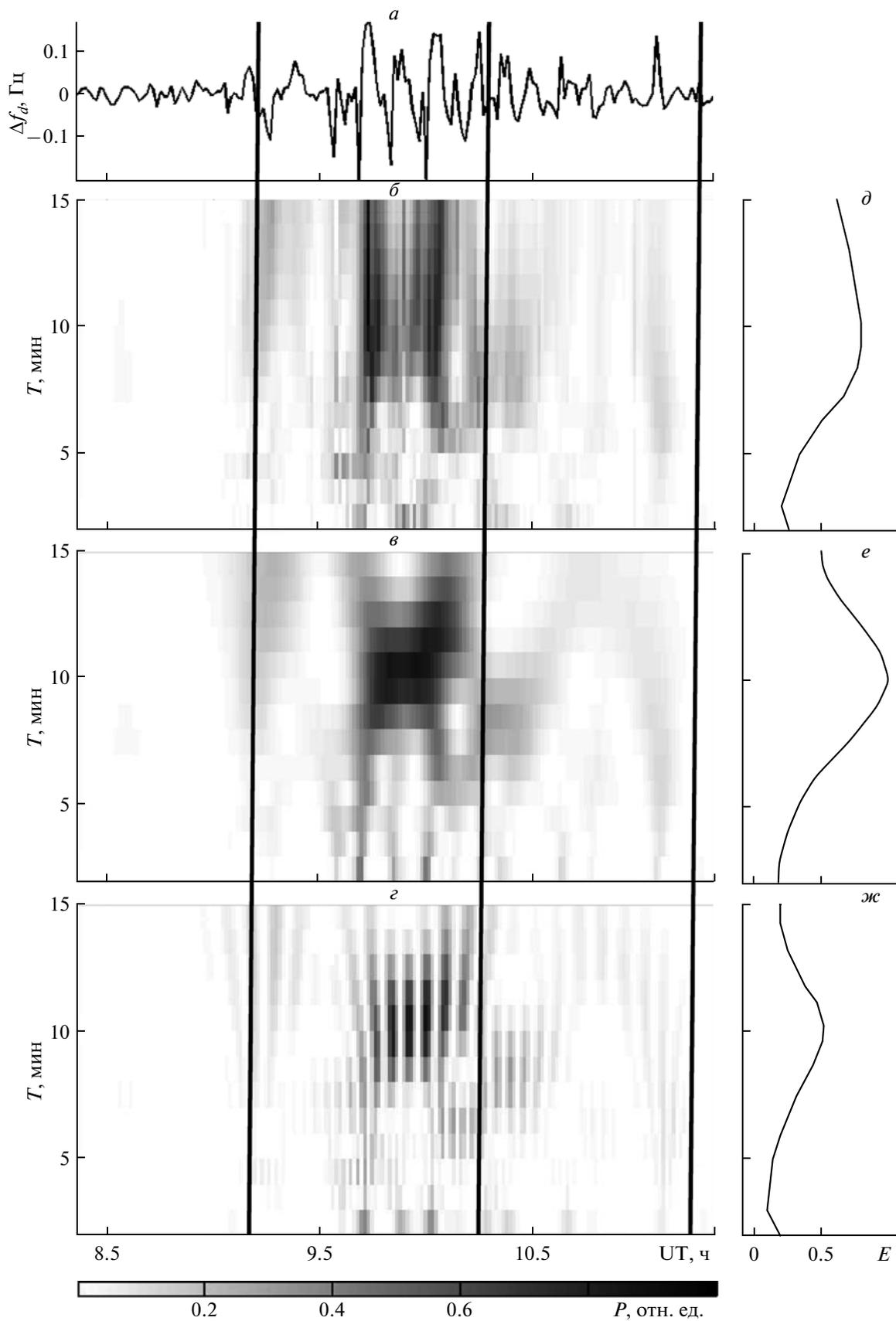
**Рис. 2.** То же, что и на рис. 1, для 31 мая 2003 г. Частота радиоволны – 3.3 МГц, диапазон действующих высот – 375–450 км.



**Рис. 3.** То же, что и на рис. 1, для 3 октября 2005 г. Частота радиоволны – 4,0 МГц, диапазон действующих высот – 225–300 км.



**Рис. 4.** То же, что и на рис. 1, для 29 марта 2006 г. Частота радиоволны – 2.7 МГц, диапазон действующих высот – 225–300 км.



**Рис. 5.** То же, что и на рис. 1, для 1 августа 2008 г. Частота радиоволны – 3.2 МГц, диапазон действующих высот – 75–150 км.

Таблица 1. Основные данные о параметрах зондирующего сигнала и ионосферных эффектах СЗ

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	3 октября 2005 г.	29 марта 2006 г.	29 марта 2006 г.	1 августа 2008 г.
Рабочая частота, МГц	3.5	3.3	4.0	2.7	4.0	3.2
$f_oF2$ , МГц	7	4.8	6.9–7.4	6.4	6.4	4.6–4.8
$\Delta f_oF2$ , МГц	0.4	0.3	0.1	1.9	1.9	0.8
$z_{\max}$ , км	280	320	215–225	220	220	190
$\Delta z_{\max}$ , км	30	30	1–2	25–30	25–30	10
$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_m$	0.11	0.12	0.025	0.5	0.5	0.32
$\bar{f}_d^{\min}$ , Гц	–0.125	–0.5	$\approx 0$	–0.2	–0.55	–0.3
$v_{1\max}$ , м/с	5.4	25	$\approx 0$	11	20	14
$\Delta t_1$ , мин	20	20	–	35	35	10
$\Delta z_1$ , км	3	15	$\approx 0$	12	22	4
$T_1$ , мин	10–20; 60–140	4–6; 10–20	2; 5–8; 15–22; 35–55	2; 6–7	2; 10–15; 20–30	5; 10; 20
$\Delta T_1$ , мин	40–50; 100–120	10; ~20	2–3; 20; 40; 80–90	5; 15	3–4; 20–25; 60	30–35
$\bar{f}_d^{\max}$ , Гц	0.167	0.7	$\approx 0$	0.125	0.5	0.45
$v_{2\max}$ , м/с	7.2	32	$\approx 0$	7	19	19
$\Delta t_2$ , мин	50	60	–	60	80	80
$\Delta z_2$ , км	11	57	$\approx 0$	12	45	45
$T_2$ , мин	10–20; 60–140	10; 25–50	15–22; 35–55	10–15; 35–50; 80–150	10–15; 20–30; 100–150	5; 10; 20
$\Delta T_2$ , мин	40–50; 100–120	20; 30–50	40; 80–90	20–25; 50–60; 200–300	20–25; 60; 200–300	60

3.2. *Регулярные эффекты.* Исходя из соотношения (3), получим выражение для описания регулярных вариаций ДСЧ в течение СЗ.

Для частоты радиоволны  $f = 3\text{--}5$  МГц вдали от максимума электронной концентрации профиль концентрации электронов удовлетворительно описывается линейным законом с характерным масштабом изменения  $N$ , равном  $L_N$ . При этом квадрат плазменной частоты

$$f_p^2(z) = f_{pr}^2 \left( 1 + \frac{z - z_r}{L_N} \right) = f^2 \left( 1 + \frac{z - z_r}{L_N} \right), \quad (6)$$

$$L_N = \left( \frac{1}{N_0} \frac{dN_0}{dz} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$N_0$  – значение  $N$  в отсутствие затмения. Будем считать, что в процессе затмения  $L_N$  остается неизменным, а варьируются значения  $N$ .

Подставляя (6) в (2) вычислим интеграл, входящий в уравнение (3),

$$\int_{z_m}^{z_r} n(z) dz = \frac{2}{3} L_N \left( \frac{z_r - z_m}{L_N} \right)^{3/2} = \frac{2}{3} L_N (1 - F)^{3/2}, \quad (8)$$

**Таблица 2.** Зависимость максимального значения модуля ДСЧ (в Гц) от частоты радиоволны, вызванного возмущением концентрации электронов вдоль траектории радиоволны

$f$ , МГц	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$\alpha = 0.5$	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09
$\alpha = 1$	0.12	0.18	0.19	0.19	0.18

где  $z_m$  – минимальная высота, начиная с которой вклад в ДСЧ становится существенным,  $F = f_{pm}^2 / f^2$ ,  $f_{pm} = f_p(z_m)$ .

Подставляя (8) в (3) и выполняя дифференцирование, получим выражение для ДСЧ

$$f_d = 2 \frac{f L_N}{c} F_0 \alpha (1 - F_0 B^\alpha)^{1/2} B^{\alpha-1} \frac{dB}{dt}. \quad (9)$$

В соотношении (9) учтено, что

$$F = F_0 B(t); B(t) = 1 - A(t), N = N_0 B^\alpha,$$

где  $A(t)$  – функция покрытия диска Солнца,  $\alpha$  – показатель степени, зависящий от вида закона рекомбинации. В  $E$ - и  $F_1$ -слоях справедлив квадратичный закон рекомбинации, и  $\alpha = 1/2$ , в слое  $F_2$  показатель  $\alpha = 1$  [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

В течение затмения функция  $B(t)$  изменяется от 1 до  $B_{\min}$ , а затем от  $B_{\min}$  до 1. В среднем значение  $\bar{B} = (1 + B_{\min})/2$ . Для полного СЗ  $B_{\min} = 0$ ,  $\bar{B} \approx 0.5$ . Максимальное по модулю значение  $dB/dt$  имеет место примерно в середине фазы покрытия диска Солнца (здесь  $dB/dt < 0$ ) и в середине фазы открывания диска Солнца (здесь  $dB/dt > 0$ ). В момент наступления главной фазы затмения  $dB/dt = 0$ .

Временная зависимость  $f_d(t)$  качественно повторяет зависимость  $dB/dt$ .

При полном СЗ  $(dB/dt)_{\max} \approx 2.8 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Полагая, что  $\bar{B} = 0.5$ ,  $L_N = 50$  км, при помощи соотношения (9) оценим значение  $|f_{d\max}|$  для разных  $f$  и  $\alpha$  (табл. 2). Из таблицы видно, что в диапазоне частот, используемых для вертикального доплеровского зондирования, значение модуля ДСЧ составляет 0.1–0.2 Гц.

Если вклад в эффект Доплера вызван движением области отражения радиоволны, из выражения (4) можно получить следующее соотношение для ДСЧ:

$$f_d = -2 \frac{v}{c} = -2 \frac{f \alpha L_N}{c} \frac{dB}{dt}. \quad (10)$$

В формуле (10) учтено, что

$$v = \frac{dz_r}{dt} = \frac{dz_r}{dN_0} \frac{dN_0}{dN} \frac{dN}{dt} = \frac{L_N}{B^\alpha} \frac{dB}{dt} = \frac{\alpha L_N}{B} \frac{dB}{dt}. \quad (11)$$

Результаты расчета  $|f_{d\max}|$  по формуле (10) приведены в табл. 3.

Из таблицы 3 видно, что значения модуля ДСЧ в результате движения области отражения в  $\sim 3$ – $5$  раза больше, чем за счет изменения  $N$  ниже этой высоты. В таблице 3 в скобках приведены также значение суммарного доплеровского эффекта, вызванного как вариациями  $N$  ниже области отражения радиоволны, так и движением этой области.

Значения ДСЧ с учетом реальной фазы затмения близки к наблюдаемым (см. табл. 1).

Оценки по формуле (11) при  $L_N \approx 50$  км,  $\bar{B} = 0.5$  дают максимальные значения модуля  $v$ , равные 14 и 28 м/с для  $\alpha = 0.5$  и 1 соответственно.

**3.3. Возмущение концентрации электронов.** Используя соотношение (3), получим выражение для оценки возмущения  $N$ .

Вначале вычислим изменение фазового пути

$$s = \int_{z_m}^{z_r} (n - n_0) dz,$$

где  $n_0$  – показатель преломления в невозмущенной среде, т.е. при  $N = N_0$ . Введем  $\Delta n$  и выполним очевидные преобразования:

$$\Delta n = n - n_0 = \frac{n^2 - n_0^2}{n + n_0} = \frac{f_{p0}^2}{f^2 (n + n_0)} \left( 1 - \frac{f_p^2}{f_{p0}^2} \right) = - \frac{f_{p0}^2}{f^2 (n + n_0)} \delta_N, \quad (12)$$

где  $\delta_N = (N - N_0)/N_0 = \Delta N/N_0$ . Наиболее значительные отличия  $n$  от  $n_0$  имеет место лишь в узком интервале высот вблизи области отражения радиоволны. В большей части траектории волны  $n \approx n_0$ . Считая далее, что в знаменателе (12)  $n \approx n_0$ , и что  $\delta_N$  слабо зависит от  $z$ , получим, что

$$s = \int_{z_m}^{z_r} \Delta n dz \approx - \frac{\delta_N}{2} \int_0^{z_r} \frac{f_{p0}^2}{f^2 n_0} dz. \quad (13)$$

Полагая, что справедливо соотношение (6), подставим его в (2) и вычислим интеграл в выражении (13):

$$L_e = \int_0^{z_r} \frac{f_{p0}^2}{f^2 n_0} dz = L_N \int_1^0 \frac{1-x}{\sqrt{x}} dx = \frac{2}{3} L_N, \quad (14)$$

где  $L_e$  – эквивалентный масштаб,  $x = (z_r - z)/L_N$ . Тогда с учетом (14)

$$s = - \frac{\delta_N}{3} L_N. \quad (15)$$

С другой стороны, как следует из выражения (3),

$$s = - \frac{c}{2f} \int_0^{\Delta t} f_d(t) dt, \quad (16)$$

**Таблица 3.** Зависимость максимального значения модуля ДСЧ в (Гц) от частоты радиоволны, вызванного движением области отражения. В скобках указаны значения ДСЧ для обеих причин вариаций ДСЧ

$f$ , МГц	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$\alpha = 0.5$	0.28(0.39)	0.33(0.44)	0.37(0.48)	0.42(0.52)	0.47(0.56)
$\alpha = 1$	0.56(0.68)	0.66(0.84)	0.74(0.93)	0.84(1.03)	0.94(1.12)

где  $\Delta t$  – продолжительность возмущения ДСЧ. Обычно, значения  $f_d$  увеличиваются по модулю от нуля до некоторого максимального значения  $f_{dm}$ , а затем убывают до нуля. Заменяя в формуле (16) интеграл его оценкой, получим

$$s \approx \frac{c}{4f} f_{dm} \Delta t. \quad (17)$$

Из (15) и (17) имеем

$$\delta_N = \frac{3c\Delta t f_{dm}}{8L_N f}. \quad (18)$$

Из выражения (18) видно, что при  $f_{dm} < 0$  значение  $\delta_N < 0$  и наоборот.

Добавим, что для  $f = 3-5$  МГц обычно  $z_r \approx 120-250$  км, а  $L_N = 25-50$  км. Если ввести эквивалентный масштаб  $L_e$ , можно пользоваться следующей формулой:

$$\delta_N = \frac{c\Delta t f_{dm}}{4L_e f}.$$

Как следует из соотношения (14), для линейного слоя  $\beta = L_N/L_e = 3/2$ . Для другой формы плазменного слоя также  $\beta \sim 1$ . Обычно  $L_e \approx 17-33$  км, в среднем  $L_e \approx 25$  км.

**3.4. Статистические эффекты.** При флуктуациях  $v$  из (4) получаем для среднего квадратичного отклонения ДСЧ выражение:

$$\sigma_f = 2f \frac{\sigma_v}{c}, \quad (19)$$

где  $\sigma_v$  – среднее квадратичное отклонение флуктуаций скорости движения области отражения радиоволны.

При наличии флуктуаций показателя преломления ниже области отражения радиоволны с характерным временем  $\tau$  для

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial \Delta n}{\partial t}$$

получаем оценку

$$\left| \frac{\partial \Delta n}{\partial t} \right| \approx \frac{|\Delta n|}{\tau}. \quad (20)$$

Из выражения (2) после статистического усреднения случайных флуктуаций  $\Delta n$  и  $\Delta N$  имеем

$$\sigma_n = \frac{\tilde{\beta}}{2} \tilde{\sigma}_N, \quad (21)$$

где  $\tilde{\sigma}_N = \sigma_N/N_0$ ,  $\sigma_N$  – среднее квадратичное отклонение флуктуаций  $\Delta N$  концентрации электронов  $N$  в ионосфере,  $\tilde{\beta} = (n^2 - 1)/n$ .

Далее из (5) с учетом (20) и (21) после усреднения  $\tilde{\beta}(z)$  по высоте в пределах от 0 до  $z_r$  получаем:

$$\sigma_f^2 = \left( \beta \frac{f}{c\tau} \right)^2 \int_0^{z_r} \int_0^{z_r} \left[ \frac{\Delta N(z') \Delta N(z'')}{N_0(z') N_0(z'')} \right] dz' dz''. \quad (22)$$

Здесь выражение в квадратных скобках представляет собой пространственную корреляционную функцию относительных флуктуаций  $\Delta N/N$ .

При размере неоднородностей  $l$ , дающих основной вклад в обратное рассеяние радиоволн, и толщине слоя с неоднородностями  $L \gg l$  из выражения (22) следует, что

$$\sigma_f \approx \beta \frac{f}{c\tau} \tilde{\sigma}_N \sqrt{Ll}. \quad (23)$$

При обратном рассеянии радиоволн имеет место закон Брэгга. При этом

$$l = \frac{\lambda}{2}.$$

Для  $f = 3.2$  МГц,  $\lambda \approx 94$  м,  $l \approx 47$  м.

Если исчезновение неоднородностей  $N$  вызвано амбиполярной диффузией, то

$$\tau = \frac{l^2}{D_z} = \frac{l^2}{D \sin^2 I},$$

где  $D$  – продольная по отношению к геомагнитному полю компонента тензора амбиполярной диффузии,  $D_z$  – ее вертикальная составляющая,  $I \approx 66.4^\circ$  – наклонение геомагнитного поля.

Если же время  $\tau$  характеризует движение неоднородностей в вертикальном направлении, интервал корреляции

$$\tau_k = \frac{l}{\sigma_v}. \quad (24)$$

По  $\sigma_v$  и  $l$  можно вычислить коэффициент турбулентной диффузии

$$D_t = \sigma_v l = \sigma_v^2 \tau_k. \quad (25)$$

**3.5. Квазипериодические эффекты.** При квазипериодических вариациях  $N$  с периодом  $T$  из соотношения (5), поступая так же, как и при выводе (18), можно получить следующее уравнение для

**Таблица 4.** Результаты оценки основных параметров ионосферы по данным доплеровского зондирования

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	29 марта 2005 г. ( $f = 2.7$ МГц)	29 марта 2006 г. ( $f = 4.0$ МГц)	1 августа 2008 г.
$L_N$ , км	23	50	37	35	26
$\delta_{N1}$	-0.21	-0.41	-0.45	-0.73	-0.09
$\delta_{N2}$	0.72	1.75	0.50	1.8	0.64
$\delta_N$	-0.48	-0.42	-0.47	-0.72	-0.17
$N_f/N_0$	1.36	1.62	0.83	0.76	1.5
$N_{f0}/N_0$	0.9	1.5	0.77	0.77	0.9
$\eta$	1.51	1.09	1.08	1	1.67

оценки амплитуды  $\delta_{Nm}$  относительных вариаций  $\delta_N = \Delta N/N_0$ :

$$f_{dm} = f \frac{2\pi L}{cT} \delta_{Nm}, \quad (26)$$

где  $f_{dm}$  – амплитуда квазипериодических вариаций ДСЧ,  $L$  – характерный масштаб, который можно полагать равным меньшему из двух величин  $L_e$  или  $2H$ ,  $H$  – приведенная высота нейтральной атмосферы.

#### 4. ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ

**4.1. Возмущение концентрации электронов.** По мере покрытия диска Солнца концентрация электронов постепенно уменьшается от  $N_0$  до  $N_{\min}$ . После момента наступления главной фазы с небольшим запаздыванием (обычно десятки – сотни секунд на высотах 100–200 км) она увеличилась от  $N_{\min}$  до значения  $N_f$ . Относительные изменения  $N$  на этих стадиях (им здесь и далее соответствуют индексы 1, 2) равны:

$$\delta_{N1} = \frac{N_{\min}}{N_0} - 1, \quad (27)$$

$$\delta_{N2} = \frac{N_f}{N_{\min}} - 1, \quad (28)$$

где  $\delta_{N1,2}$  даются соотношением (26). Из (27) и (28) следует, что

$$\frac{N_f}{N_0} = (1 + \delta_{N1})(1 + \delta_{N2}). \quad (29)$$

Поскольку в течение затмения (~2 ч) зенитный угол  $\chi$  заметно изменяется,  $N_0$  в выражении (29) необходимо заменить на  $N_{f0}$ , которое равно

$$N_{f0} = N_0 \left( \frac{\cos \chi}{\cos \chi_0} \right)^\alpha. \quad (30)$$

Отсюда

$$\eta = \frac{N_f}{N_{f0}} = (1 + \delta_{N1})(1 + \delta_{N2}) \left( \frac{\cos \chi_0}{\cos \chi} \right)^\alpha. \quad (31)$$

Результаты расчета  $\delta_{N1}$ ,  $\delta_{N2}$ ,  $N_f/N_0$ ,  $N_{f0}/N_0$  и  $\eta$  по соотношениям (27), (28), (29), (30) и (31) приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что  $\eta \geq 1$ . Заметим, что при  $\eta > 1$  концентрация электронов после окончания СЗ больше, чем до его начала.

**4.2. Параметры турбулентных процессов.** Рассмотрим возможность оценки параметров турбулентных процессов из данных наблюдений на примере СЗ 1 августа 2008 г. За 0.5 ч до СЗ  $\sigma_f \approx 0.025$  Гц (рис. 5). С 08:50 до 09:00 значение  $\sigma_f$  выросло от 0.025 до 0.05 Гц. Таким это оно оставалось в течение ближайших 15 мин. После 09:15  $\sigma_f$  увеличивалось до максимального значения  $\sigma_{f\max} \approx 0.15$  Гц, которое наблюдалось в интервале времени 09:45–09:56. Затем значение  $\sigma_f$  в течение часа уменьшалось от 0.15 до 0.05 Гц.

Результаты оценок статистических параметров среды по соотношениям (19), (24) и (25) приведены в табл. 5. Считалось, что  $l = \lambda/2 \approx 47$  м ( $f = 3.2$  МГц).

Заметим, что расчет для дневной модели ионосферы в условиях минимальной солнечной активности дает, что значения  $D$ , равные  $1.3 \times 10^2$  и  $4 \times 10^2$  м<sup>2</sup>/с, имеют место на высотах ~115 и 122 км. Зондирующая волна перед СЗ и в его главную фазу отражалась, как показал анализ ионограмм, соответственно вблизи высот 116 и 120 км.

Таким образом, флуктуации значения ДСЧ вызваны, скорее всего, флуктуациями скорости движения высоты отражения в результате образования и диффузионного расплывания неоднородностей  $N$ .

Наряду с флуктуациями ДСЧ имело место значительное (до 1–1.5 Гц) уширение ДС. Рассмотрим это подробнее.

Уширение  $\sigma_{fs}$  ДС также описывается соотношением (23). Если в этом соотношении положить  $\tau = \tau_k = 7-27$  с, значение  $L \approx L_N \approx 57$  км ( $L_N$  – характерный масштаб изменения  $N(z)$ , который определен из анализа ионограмм) и  $\bar{\sigma}_N = 0.03-$

0.10, получим, что при  $\beta \approx 1.3$  (оно вычислено по профилю  $N(z)$ )  $\sigma_{fs} \approx 0.03-0.32$  Гц. Напомним, что для линейного профиля  $N(z)$  значения  $\beta = 1.5$ . Даже верхнее значение  $\sigma_{fs}$  существенно отличается от наблюдаемого (1–1.5 Гц).

Более правдоподобным механизмом уширения ДС в этом эксперименте является рассеяние зондирующей радиоволны на неоднородностях  $N$  в пределах слоя  $Es$  (наблюдался в дневное время 1 и 2 августа 2008 г.). Слой  $Es$  находится на высоте  $z \approx 100$  км, где могла быть существенной турбулентная диффузия. Известно, что коэффициент турбулентной диффузии здесь может составить  $5 \times 10^3-10^4$  м<sup>2</sup>/с [Данилов и др., 1987]. Тогда для  $l \approx 47$  м  $\tau = l^2/D_t \approx 0.22-0.44$  с. Полагая, как и в предыдущем случае,  $\tilde{\sigma}_N = 0.03-0.1$ , получим, что при толщине  $Es$ -слоя  $L \approx 1$  км,  $\beta = 1.3$ ,  $\sigma_{fs} \approx 0.2-1.4$  Гц. Большее значение  $\sigma_{fs}$  близко к наблюдаемому (1–1.5 Гц). Оно имеет место при  $D_t \approx 10^4$  м<sup>2</sup>/с и  $\tilde{\sigma}_N \approx 0.1$ .

**4.3. Параметры квазипериодических вариаций.** В процессе СЗ 1 августа 2008 г. были ярко выражены три квазипериодических процесса: с  $T \approx 5$  мин,  $f_{dm} \approx 0.1-0.2$  Гц,  $T \approx 10$  мин,  $f_{dm} \approx 0.2-0.3$  Гц и  $T \approx 20-22$  мин,  $f_{dm} \approx 0.1-0.2$  Гц. Из соотношения (26) следует, что этим колебаниям соответствуют значения  $\delta_{Nm}$ , равные 1.7–3.4, 6.8–13.6 и 6.8–10.2 %.

Для других затмений значения периодов колебаний изменялись в пределах от 3–4 до 60–80 мин, а их амплитуда составляла  $\sim 1-10$  %.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Эффекты каждого из рассмотренных СЗ обладал своей спецификой. Обсудим их кратко.

**СЗ 11 августа 1999 г.** Несмотря на то, что фаза СЗ достигала 0.78, значение  $A_{\max} = 0.73$ ,  $B_{\min} = 0.27$ , ожидалось, что в  $E$ -, а также  $F1$ -слоях  $\delta_{N\max} = B_{\min}^{1/2} \approx -0.48$ . ДСЧ было относительно невелико (около  $-0.1$  Гц). Оцененное по данным измерений значение  $\delta_{N1\max} \approx -0.21$ , что существенно меньше расчетного значения. Причина расхождения, скорее всего, заключается в том, что на эффект уменьшения  $N$ , вызванный затмением, наложился эффект увеличения  $N$  в результате срабатывания дополнительного источника ионизации. Он привел к относительному изменению  $N$  на величину  $\delta_{Np} = \delta_{N1\max} - \delta_{N\max} \approx 0.27$ .

Предположение о появлении дополнительного источника ионизации подкрепляется и расчетом параметра  $\eta$ . Для этого затмения  $\eta \approx 1.51$  (см. табл. 4). Если бы источник ионизации отсутствовал, параметр  $\eta = 1$ .

**СЗ 31 мая 2003 г.** Это затмение наблюдалось утром, в период быстрого уменьшения зенитного

**Таблица 5.** Статистические характеристики параметров сигнала и среды

$\sigma_{fs}$ Гц	0.025	0.05	0.075	0.10	0.15
$\sigma_v$ , м/с	1.18	2.35	3.5	4.7	7.0
$\tau_k$ , с	26.8	20	13.4	10	6.7
$D_t$ , м <sup>2</sup> /с	55	$1.1 \times 10^2$	$1.65 \times 10^2$	$2.2 \times 10^2$	$3.3 \times 10^2$

угла – в течение фазы покрытия диска Солнца  $\cos \chi$  увеличился в  $\sim 4$  раза. На эффект утреннего роста  $N$  наложился эффект уменьшения  $N$ , обусловленный затмением. При этом  $\delta_{N1\max} \approx -0.41$ , а расчетное значение  $\delta_{N\max} \approx -0.42$ . После окончания затмения  $\delta_{N2\max} \approx 1.75$ , а  $\eta \approx 1.09$  (см. табл. 4). В ходе этого СЗ источник дополнительной ионизации, если и появлялся, то роль его была незначительной. Он мог увеличить  $N$  на  $\sim 9\%$ .

**СЗ 3 октября 2005 г.** Для этого затмения  $A_{\max} = 0.13$  и расчетное значение  $\delta_{N\max} \approx -0.07$ , ему соответствует  $f_{d\max} \approx 1.5 \times 10^{-2}$  Гц. Такое значение ДСЧ соизмеримо с погрешностью метода. Поэтому возмущения  $N$  в течение этого СЗ уверенно не отмечались.

**СЗ 29 марта 2006 г.** Измерения выполнены на двух частотах радиоволн – 2.7 и 4.0 МГц. Первая из них отражалась в  $E$ -области, а вторая – в  $F$ -области ионосферы. Как и следовало ожидать, на большей частоте ДСЧ было большим. Расчетные значения  $\delta_{N\max}$  составляли  $-0.47$  и  $-0.72$  для  $E$ - и  $F$ -областей соответственно. При расчетах учитывалось, что в  $E$ -области ионосферы  $\delta_{N\max} = \sqrt{B_{\min}} - 1$ , а в  $F$ -области  $\delta_{N\max} = B_{\min} - 1$ . Оцененные по данным измерений значения  $\delta_{N1\max}$  при этом равнялись  $-0.45$  и  $-0.73$ .

После окончания затмения  $\delta_{N2\max}$  принимали значения 0.50 и 1.8, параметр  $\eta$  равнялся 1.08 и 1 для  $E$ - и  $F$ -областей ионосферы соответственно. Отличие  $\eta$  от 1 в нижней части ионосферы могло свидетельствовать о появлении дополнительного источника ионизации. Роль его, однако, незначительна – увеличение  $N$  составляло 8%.

**СЗ 1 августа 2008 г.** Особенности этого затмения были следующие. Функция покрытия диска Солнца не превышала 0.31. СЗ имело место в период глубокого минимума солнечной активности, максимум электронной концентрации располагался вблизи высоты  $z \approx 190$  км. Наконец, 1 и 2 августа область  $F$  заметно экранировалась слоем  $Es$ . Это привело к ослаблению уровня сигнала, к его рассеянию в нижележащей области ионосферы. Последнее обстоятельство позволило оценить параметры турбулентной среды.

Расчетное значение  $\delta_{N\max} \approx -0.17$ . В то же время из экспериментальных данных получено, что

$\delta_{N1\max} \approx -0.09$ ,  $\delta_{N2\max} \approx 0.64$ . При этом  $\delta_{Np} = 0.08$ . Это означает, что уже на стадии покрытия диска Солнца проявлялся дополнительный источник ионизации. После наступления момента главной фазы его роль заметно выросла. При этом  $\eta \approx 1.67$ . Это означает, что в конце затмения концентрация электронов была на 67% больше, чем ее ожидаемое значение.

Таким образом, в течение двух СЗ роль дополнительного источника ионизации была значительной (увеличение  $N$  в  $E$ -области ионосферы составляло ~50–70%), в течение двух СЗ увеличение  $N$  не превышало 10%.

В качестве дополнительного источника ионизации могли выступать “мягкие” электроны, высыпавшиеся из магнитосферы. Этот источник более подробно рассмотрен в работе автора [Черногор, 2000].

Расчеты по методике [Черногор, 2000] показывают, что для увеличения  $N$  в  $E$ -области ионосферы на 50–70% необходима плотность потока электронов около  $10^{12}$ – $4 \times 10^{12}$  м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> при их энергии 3–1 кэВ соответственно.

Кроме регулярных изменений  $N$  в ионосфере, как оказалось, СЗ вызывают изменение спектрального состава ВВ в диапазоне периодов от нескольких минут до 60–80 мин. Периоды от 5–6 до 60–80 мин имеют внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые в течение затмений наблюдались рядом авторов (см., например, [Vuther et al., 1979; Jones et al., 2004; Костров и Черногор, 2000; Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2006, 2007; Бурмака и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]).

Периоды ВВ, равные 2–5 мин, имеют инфразвуковые волны (ИВ) [Госсард и Хук, 1978]. Насколько нам известно, до настоящего времени в литературе отсутствовали сведения о генерации инфразвука затмениями. Относительные изменения  $N$  в ВГВ и ИВ составляют 1–10 и ~1% соответственно.

Обнаружению инфразвуковых колебаний способствовало применение радара доплеровского зондирования, как адекватного инструмента наблюдения и системного спектрального анализа, как адекватного метода выявления квазипериодических достаточно высокочастотных (периоды 2–5 мин) процессов.

Рассмотрение статистических эффектов, приводящих к уширению и диффузности ДС, позволило оценить параметры атмосферной турбулентности.

Важно, что полученные в процессе обработки экспериментальных данных параметры среды соответствуют результатам, приведенным в литературе.

Подтверждено, что СЗ приводят к перестройке взаимодействия подсистем в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера [Черногор, 2003, 2006, 2007].

## 6. ВЫВОДЫ

1. Зарегистрированы и объяснены вариации доплеровского смещения частоты на всех стадиях СЗ. Они обусловлены сначала уменьшением ДСЧ на величину, не превышающую 0.55 Гц, а затем увеличением на величину, достигающую 1 Гц.

Такие регулярные изменения ДСЧ связаны сначала с уменьшением, а затем увеличением концентрации электронов в  $E$ - и нижней части  $F$ -области ионосферы.

Оцененные из данных наблюдений значения  $\delta_{N1\max}$  изменялись от ~–0.10 до –0.70 в зависимости от фазы затмения и высоты отражения радиоволны. После окончания СЗ значения  $\delta_{N2\max}$  составляли 0.5–1.8.

2. Показано, что после окончания СЗ концентрация электронов обычно превышала значения  $N$ , которые были до затмения. Скорее всего, СЗ стимулировало высыпание электронов с энергиями порядка 1 кэВ из магнитосферы. Оценены параметры потока электронов. Они оказались порядка  $10^{12}$  м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

3. Зафиксировано появление в течение СЗ квазипериодических вариаций доплеровских спектров, связанных с генерацией и распространением АГВ в атмосфере. Подтверждено, что затмение сопровождается генерацией внутренних гравитационных волн (периоды  $T \approx 10$ –80 мин).

Впервые выявлены инфразвуковые волны ( $T \approx 2$ –5 мин), сопутствовавшие СЗ.

Квазипериодические вариации усиливались через ~30–40 мин после начала затмения и продолжались в течение последующих 1.5–2 часов.

Продолжительность существования инфразвуковых возмущений не превышала 10 мин.

4. Продемонстрировано, что доплеровское зондирование ионосферы на вертикальных трассах, использующее радиоволны в диапазоне частот 3–5 МГц, является удобным и информативным инструментом для изучения эффектов СЗ в околоземной среде.

Для выявления квазипериодических возмущений в ионосфере, сопровождающих затмения, рекомендуется использовать системный спектральный анализ, базирующийся на оконном и адаптивном преобразованиях Фурье, а также вейвлет-преобразовании.

5. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Автор благодарен В.П. Бурмаке, Н.Н. Мухортовой и С.В. Панасенко за помощь при обработке данных и оформлении рукописи статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов 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 соврем. радиоэлектроники. № 2. С. 25–63. 2002.
- 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. Т. 45. № 4. С. 526–551. 2005.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 528 с. 1988.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 2. С. 193–208, Т. 46. № 2. С. 209–218. 2006.
- 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. 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.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 350–364. 2008.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат. 272 с. 1987.
- Костров Л.С., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. № 4. С. 361–370. 2000.
- Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий Н.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении дециметровых радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 28. № 4. С. 473–500. 1975.
- Черногор Л.Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. № 4. С. 371–375. 2000.
- Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003.
- 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.
- Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 807–818. 2012.
- 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.
- 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.