

УДК 550.388

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

© 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 20.05.2009 г.
После доработки 05.03.2011 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований вариаций доплеровского смещения частоты на вертикальной радиотрассе, вызванных частными солнечными затмениями. Затмения наблюдались вблизи г. Харькова в 1999–2008 гг. Фаза затмения изменялась от 0.24 до 0.78. Показано, что затмения вызывали знакопеременные вариации доплеровского смещения частоты, деформации доплеровских спектров, а также квазипериодические изменения доплеровского смещения частоты. Это свидетельствовало о вызванных затмениями изменениях концентрации электронов, генерации волновых процессов и движениях плазмы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что качественно новое понимание наблюдаемых процессов во всех геосферах и околоземной космической среде в частности, а также их моделирование стало возможным в результате системного подхода к объекту Земля (тектоносфера, подстилающая поверхность)–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) [Черногор, 2003; Chernogor and Rozumenko, 2008]. Важно, что образование ЗАИМ – открытая динамическая и нелинейная система. Между ее подсистемами существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Воздействие на систему ЗАИМ высокоэнергетичных источников приводит к перестройке характера взаимодействия подсистем.

Наряду с сильными землетрясениями, извержениями вулканов, прохождением мощных атмосферных фронтов, движением солнечного терминатора и т.д. солнечное затмение (СЗ) также относится к высокоэнергетичным источникам. Затмение приводит к охлаждению, а значит и изменению внутренней энергии объемов атмосферы с характерной длиной ~ 10 тыс. км и характерной шириной ~ 4 тыс. км. При этом температура в стратосфере уменьшается в среднем на 10 К, а в термосфере – на 100 К. В результате этого внутренняя энергия стратосферного и термосферного газа уменьшается на 3–4 и 10–12% соответственно. При объемах охлажденного газа порядка $4 \times 10^{17} \text{ м}^3$ масса охлажденного газа составляет $\sim 4 \times 10^{15}$ и 4×10^{11} кг на стратосферных и термосферных высотах. Им соответствует умень-

шение внутренней энергии на 4×10^{19} и 4×10^{15} Дж (мощности – $\sim 10^{16}$ и 10^{12} Вт).

Для сравнения укажем, что сильнейшее землетрясение имеет энергию, равную 10^{18} – 10^{19} Дж, мощность 10^{16} – 10^{17} Вт [Черногор, 2003; Chernogor and Rozumenko, 2008]. Большая (сверхсильная, крайне сильная) магнитная буря характеризуется энергией порядка 10^{16} Дж и мощностью $\sim 10^{12}$ Вт [Черногор, 2003; Chernogor and Rozumenko, 2008].

Таким образом, СЗ приводит к существенному изменению параметров околоземной среды и взаимодействиям между подсистемами.

Для диагностики сопутствующих затмению процессов в ионосфере используются ОНЧ, НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ и УВЧ-радиоволны, различные методы – оптические [Акимов и др., 2005], ракетные, спутниковые [Afraimovich et al., 1998; Desphande et al., 1982; Rama Rao et al., 1982], метод частичных отражений [Гоков и Черногор, 2000; Черногор, 2000; Беликович и др., 2007], доплеровский метод [Ishinose and Ogawa, 1976; Костров и Черногор, 2000], методы вертикального и наклонного зондирования [Беликович и др., 2007; Бойтман и др., 1999; Борисов и др., 2000], метод некогерентного рассеяния [Baron, 1973; MacPher-son et al., 1998; Salah et al., 1986; Акимов и др., 2005; Бурмака и др., 2006, 2007a, 2007b; Бурмака и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008] и другие методы (см., например, [Bertin et al., 1977; Buther et al., 1979; Chandra et al., 1980; Farges et al., 2003; Jones et al., 2004; Мусатенко и др., 2006]).

В данной работе для дистанционной радиофизической диагностики процессов, вызванных СЗ, используется метод вертикального доплеровско-

Таблица 1. Основные данные о солнечных затмениях

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	3 октября 2005 г.	29 марта 2006 г.	1 августа 2008 г.
Начало СЗ	09:57	02:10	08:36	10:02	09:11
Главная фаза СЗ	11:13	03:10	09:38	11:12	10:15
Конец СЗ	12:29	04:20	10:42	12:21	11:17
Фаза СЗ	0.78	0.74	0.24	0.77	0.42
Максимальное значение функции покрытия Солнца	0.73	0.66	0.13	0.72	0.31
Максимальное уменьшение освещенности, разы	3.7	2.9	1.15	3.6	1.4

го зондирования (ДЗ) в ВЧ-диапазоне радиоволн. Как известно, этот метод относится к весьма высокочувствительным и обладает приемлемым временным и высотным разрешением. Именно эти качества необходимы для исследования кратковременных динамических процессов в ионосфере.

В настоящей работе описаны результаты исследований эффектов СЗ, имевших место в окрестности г. Харькова в 1999–2008 гг. Для наблюдения использовался один и тот же радар ДЗ, единая методика обработки и анализа данных. Затмения отличались положением в цикле солнечной активности, состоянием космической погоды, фазой и временем суток.

Основные процессы, сопутствовавшие этим затмениям и детально изученные при помощи метода некогерентного рассеяния, описаны нами в работах [Акимов и др., 2005; Бурмака и др., 2006, 2007а, 2007б; Бурмака и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]. В этих работах в основном обсуждались эффекты вблизи максимума электронной концентрации и во внешней ионосфере. В то же время метод ДЗ удобен для наблюдения нестационарных процессов в E -области и нижней части F -области ионосферы.

Цель настоящей работы — изложение результатов сравнительного анализа эффектов пяти затмений Солнца и оценок параметров регулярной и нерегулярной структуры околоземной среды.

В части 1 описаны результаты измерений и их обсуждение. В части 2 изложены результаты спектрального анализа временных вариаций доплеровского смещения частоты (ДСЧ), расчетов и оценок возмущений параметров сигнала, а также параметров ионосферы и ее неоднородной структуры.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Основные характеристики и параметры СЗ приведены в табл. 1. Видно, что все затмения были частными, их фаза изменялась от 0.24 до 0.78, максимальное значение функции покрытия

Солнца — от 0.13 до 0.73, а максимальное уменьшение освещенности — от 1.15 до 3.7 раза.

Одно СЗ имело место в послевосходное время, а именно с 02:10 до 04:20 (здесь и далее UT). Остальные четыре затмения наблюдались в околополуденное время.

3. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды удобно характеризовать при помощи параметров солнечного ветра (измеренных концентрации частиц n_{sw} , температуры T_{sw} , скорости V_{sw} и рассчитанного давления p_{sw}), рассчитанной энергетической функции Акасофу ϵ_A , значений межпланетного магнитного поля (и в частности компоненты B_z), плотностей потоков протонов Π_p и электронов Π_e , индексов солнечной ($F10.7$) и геомагнитной (Dst , Kp и Ap) активностей. Средние числовые значения этих параметров приведены в табл. 2.

Из таблицы 2 видно, что все СЗ, кроме затмения 31 мая 2003 г., происходили в условиях “хорошей” космической погоды. (Под “хорошей” космической погодой понимается практически невозмущенное состояние геокосмической среды.) В частности, значение индексов Kp и Dst изменялись от 1 до 2 и от +10 до –15 нТл. Это значительно облегчило выделение эффектов СЗ в вариациях характеристик сигнала доплеровского радара.

Затмение 31 мая 2003 г. развивалось в период восхода Солнца на фоне завершающейся сверхсильной ($Kp_{max} = 8$) магнитной бури. Во время СЗ $Kp \approx 3-5$.

4. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

4.1. Сведения о доплеровском радаре. Радар расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина вблизи г. Харькова (49°38' N, 36°20' E), Украина.

Радар состоит из передающего и приемного радиоустройств, приемо-передающей антенны, системы регистрации и обработки данных.

Таблица 2. Состояние космической погоды

Характеристики и параметры	11 августа 1999 г.	31 мая 2003 г.	3 октября 2005 г.	29 марта 2006 г.	1 августа 2008 г.
n_{sw} , 10^7 м^{-3}	0.6	0.2	0.5–1	3	0.4–0.5
T_{sw} , 10^5 К	1	~1	0.3–0.4	0.5	0.5
V_{sw} , км/с	350	700	350–360	370–380	370–380
p_{sw} , нПа	1–1.5	~5	2–3	0.5–0.7	1.6–1.7
ε_A , ГВт	1–10	1–10	~0.1	~0.1	0.7–0.8
Π_p , $10^2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$	~2	1–10	~1	1–3	1–3
Π_e , $10^4 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$	~50	10–100	10–20	50–100	250–300
Bz , нТл	1–5	1–5	~1	~5	1–2
Dst , нТл	–10	–30	–15	+10	+5
Kp	1	3–4	2	1	1
Ap	8	17	7	6	3
$F10.7$, $10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$	128	113	79	78	66

Основные параметры радара, излучающего вертикально вверх радиоимпульсы, следующие: диапазон частот $f = 1\text{--}24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц.

Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1\text{--}10$ в зависимости от частоты волны. Отношение сигнал/помеха q достигает $10^5\text{--}10^6$.

Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения, регистрацию и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени.

Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает $c\tau/2 \approx 75$ км. Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот $z' = 75\text{--}450$ км.

Сигнал биений колебаний опорного генератора и отраженного сигнала в цифровом виде (частота опроса – 10 Гц) записывается на жесткий диск.

4.2. Методика обработки данных. Из сигнала биений выделялась амплитуда биений и доплеровское смещение частоты. При помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры (ДС) в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2.5 до $+2.5$ Гц на интервале времени 60 с (разрешение по частоте ~ 0.02 Гц).

Далее определялись значения ДСЧ, соответствующие максимуму в ДС и строились временные ряды $f_d(t)$. Затем эти ряды подвергались спектральному анализу, имеющему цель выявить

долгопериодные (периоды $T = 5\text{--}180$ мин) квазипериодические процессы.

Погрешность оценки ДСЧ составляет $(1.8\text{--}5.8) \times 10^{-3}$ Гц при $q = 10^3\text{--}10^2$ соответственно. Можно показать, что она дается формулой

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{12}{qT_d^2}}$$

где T_d – интервал времени, на котором осуществляется спектральное оценивание.

4.3. Спектральный анализ. Для спектрального анализа использовались дополняющие друг друга оконные преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных анализа такой же, как в работе [Черногор, 2008].

Для ОПФ и АПФ в работе используются следующие выражения:

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

$$A_v f(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{vT_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{vT_v/2}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi}{T_v}(t-\tau)\right) dt,$$

где τ – временной сдвиг, t – безразмерное время, t_{wS} – ширина окна для ОПФ; $T = 2\pi/\omega$ и $T_v = 2a/v$ – величины, имеющие физический смысл периодов колебаний, a – параметр масштабирования.

Для ОПФ и АПФ в качестве $g(t)$ использовалось окно, имеющее вид:

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

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

Непрерывное ВП функции $f(t)$ осуществляется на основании выражения.

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

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

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

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

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

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

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 [Черногор, 2008]:

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

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

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

СЗ 11 августа 1999 г. Измерения выполнены на двух частотах, примерно равных 3.3 и 3.5 МГц. Опишем эффекты на частоте $f = 3.5$ МГц.

Днем 10 августа 1999 г. ионосфера была достаточно спокойной (рис. 1а). Доплеровское смещение частоты $f_d \approx 0$. Эпизодически наблюдалось уширение ДС и их “рассыпание”, ширина спектра при этом достигала 0.5 Гц.

С 10:10 до 11:15 ионосфера оставалась практически невозмущенной. В интервале времени 11:15–12:35 ДС были чаще “рассыпанными”, чем одномодовыми. В течение следующего часа ионосфера была скорее невозмущенной. После 13:30 в ней возникли заметные возмущения, квазипериодические колебания с переменным периодом.

Днем 12 августа 1999 г. ионосфера была умеренно возмущенной. Большую часть времени имело место уширение ДС до 0.7–0.8 Гц и их “рассыпание”. Эпизодически появлялись слабые квазипериодические процессы с $T \approx 6$ мин и амплитудой $f_{da} \approx$

≈ 0.1 Гц. В интервале времени 10:10–11:10 характер сигнала практически не изменялся. С 11:10 до 12:40 “рассыпанный” ДС перемежался с одномодовым. В интервале времени 12:40–12:50 сигнал был преимущественно двухмодовым, разность доплеровских частот достигала 1 Гц. После 12:50 ионосфера была практически невозмущенной.

В день СЗ состояние ионосферы было иным (рис. 1б). Примерно с 06:00 до 10:15 спектр был “рассыпанным”, его ширина изменялась от 0.5 до 1 Гц. Лишь за 10 мин до начала СЗ его ширина уменьшилась до 0.2 Гц, а с 10:15 и 11:35 он оставался одномодовым. Важно, что в интервале времени 10:42–11:07 наблюдался квазипериодический процесс с переменным периодом. Преобладали периоды ~ 4 и 11 мин. В это же время постоянная составляющая $f_d \approx -0.1$ Гц (минимальное значение равно -0.125 Гц). Примерно с 11:08 до 11:18 смещение $f_d(t) \approx 0$. В интервале времени 11:18–12:00 величина $f_d \approx 0.1$ Гц (максимальное значение не превышало 0.17 Гц). На положительное смещение доплеровской частоты накладывается “рассыпание” ДС, а затем кратковременный квазипериодический процесс с переменным периодом. С 12:10 в течение следующего часа сигнал был практически одномодовым. С 13:10 до 13:30 имело место уширение ДС до 0.3–0.6 Гц. В интервале времени 13:18–13:28 наблюдалась вторая мода, сдвинутая по частоте на величину до 1.1 Гц. Интересно, что на частоте 3.3 МГц эта мода практически не наблюдалась. В остальном ДС на частотах 3.3 и 3.5 МГц все три дня были похожими.

После 13:50 в ионосфере наблюдался квазипериодический процесс с $T \approx 7$ мин и $f_{da} \approx 0.1$ Гц.

СЗ 31 мая 2003 г. В фоновый день 30 мая поведение ДС было следующим (рис. 2а). В утреннее время ДСЧ было положительным. Значения f_d достигали 0.6 Гц. Имели место квазипериодические вариации ДСЧ. Их амплитуда составляла 0.10–0.15 Гц, а период – 5–10 и 15 мин. Эпизодически ДС уширялись. При этом их ширина достигала 0.5 Гц.

В день СЗ в предвосходное и восходное время ДС были диффузными (рис. 2б). Их ширина изменялась от 0.5 до 2 Гц. Центральная частота ДС варьировалась по квазипериодическому закону.

Восход Солнца сопровождался усилением колебаний с периодами 30–50, 65–85 и 120–180 мин.

Непосредственно перед началом СЗ и вскоре после него наблюдались резкие изменения ДСЧ (\sim от -0.5 до 1 Гц). Характерное время этих изменений составляло 2 мин. Кроме того, постоянная составляющая ДСЧ постепенно уменьшалась от 0 до -0.43 Гц.

В интервале времени 02:20–02:55 ДСЧ варьировалось незначительно. С 02:56 до 03:06 ДСЧ

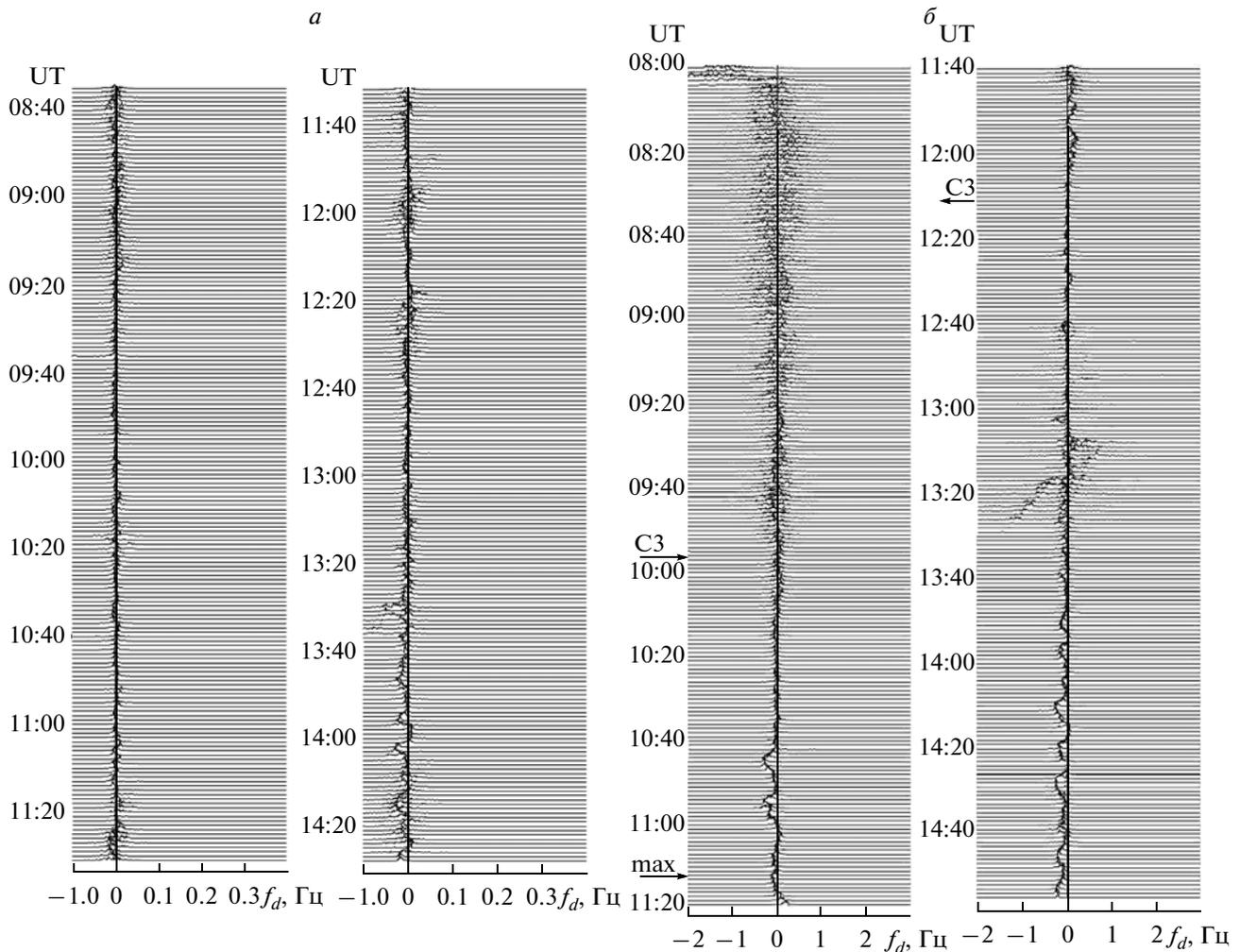


Рис. 1. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 3.49 МГц для диапазона действующих высот 75–150 км: *a* – 10 августа 1999 г.; *б* – 11 августа 1999 г.

сначала уменьшалось от 0 до -0.5 Гц, а затем увеличивалось от -0.5 до 0 Гц.

Вблизи главной фазы затмения ДСЧ резко увеличилось до 1 Гц, а затем постепенно за десятки минут уменьшалось до 0 Гц. На этот плавный ход ДСЧ накладывались квазипериодические колебания с периодами 8–10 и ~ 20 мин.

СЗ 3 октября 2005 г. В фоновый день 4 октября ионосфера оставалась спокойной (рис. 3а). В светлое время суток наблюдался квазипериодический процесс. Чаще всего период был близок к 5 и 12–13 мин. Амплитуда ДСЧ составляла 0.04–0.08 Гц.

В день СЗ ионосфера также была спокойной (рис. 3б). За 40 мин до начала затмения в ионосфере существовал квазипериодический процесс с периодом 7–10 и 20–25 мин и амплитудой $f_{da} \approx 0.04$ Гц. Практически в момент начала СЗ амплитуда колебания увеличилась до 0.1–0.12 Гц, $T \approx 7$ мин, $\Delta T \approx 14$ мин. С 09:08 по 09:13 имело место уширение (до 0.5 Гц) ДС.

После 09:24 квазипериодический процесс опять усилился. Его амплитуда увеличилась до 0.12 Гц, период был близок к 6–8 и 30–35 мин. Крутизна фронтов в волновом возмущении существенно различалась для переднего фронта она составляла 1–2 мин, для заднего – 5–6 мин.

Квазипериодические вариации ДСЧ продолжались до $\sim 12:00$.

В интервале времени 10:30–10:49 наблюдался солитоноподобный волновой пакет. Он состоял из 2–2.5 колебаний с периодом $T \approx 6$ мин. Амплитуда ДСЧ достигала 0.15 Гц.

СЗ 29 марта 2006 г. Для исследования особенностей эффектов затмения в *E*- и *F*-областях измерения выполнены на двух частотах: 2.74 и 4.004 МГц.

Рассмотрим временные вариации ДС на частоте 2.74 МГц (рис. 4а, б).

В фоновый день, 28 марта, в интервале времени 10:30–12:45 *E*-область ионосферы оставалась

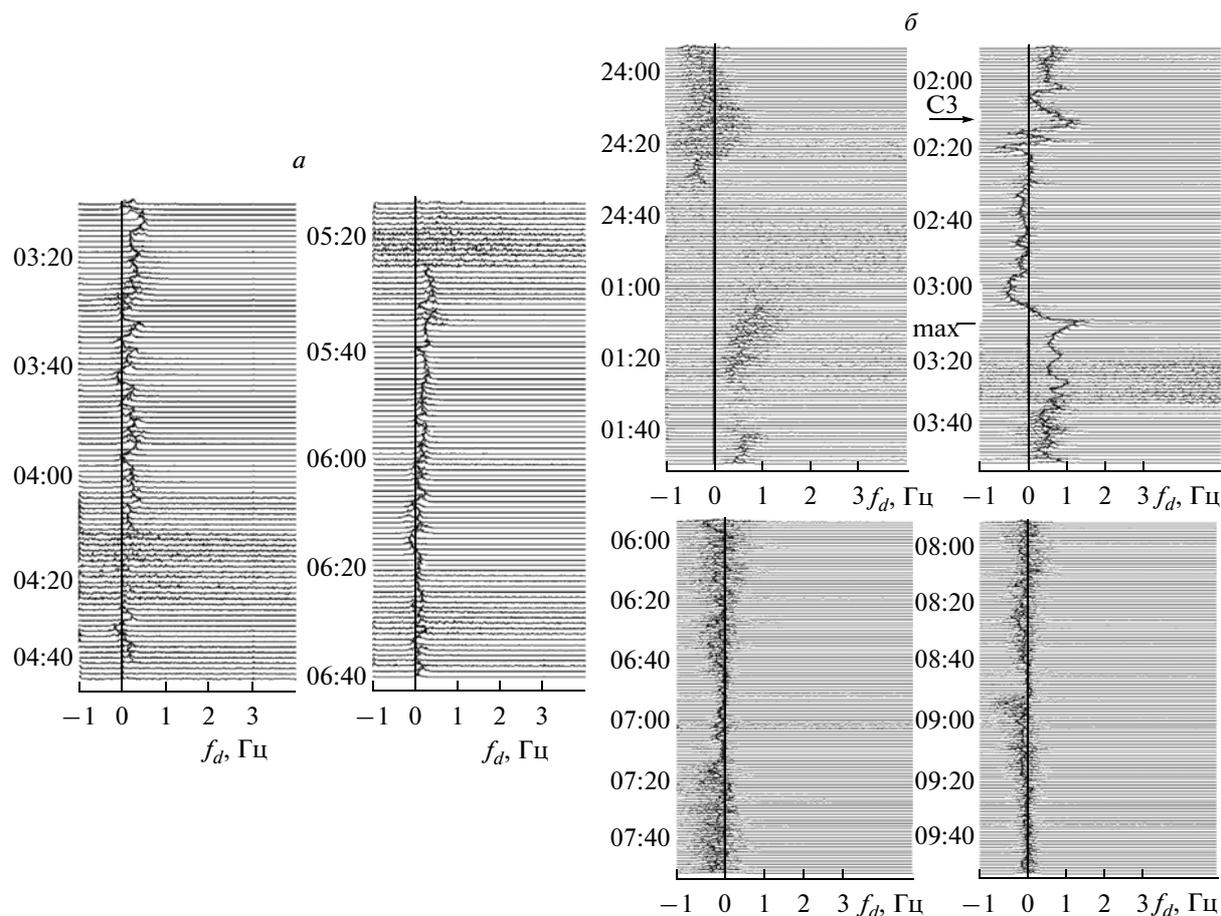


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 3.276 МГц для диапазона действующих высот 375–450 км: *a* – 30 мая 2003 г.; *б* – 31 мая 2003 г.

спокойной: вариации ДСЧ не превышали ± 0.1 Гц (см. рис. 4а). Наблюдались слабо выраженные квазипериодические изменения f_d с периодами $T \approx 5-10$ мин. После 12:45 величина флуктуаций ДСЧ увеличилась и около 14:00 амплитуда колебаний достигла 0.6 Гц. Впоследствии ее величина не превышала 0.25 Гц. Кроме того, после 13:00 среднее значение \bar{f}_d стало отрицательным, его значение было близко к -0.3 Гц. Начали сказываться предвечерние эффекты.

В фоновый день, 30 марта, значения $\bar{f}_d \approx 0$. Эпизодически наблюдались диффузные спектры. В целом *E*-область ионосферы была невозмущенной.

В день СЗ вариации ДСЧ изменились качественно. Примерно с 09:00 до 10:10 значения $f_d \approx 0$ (см. рис. 4б). В интервале времени 10:10–10:40 ДСЧ уменьшалось до -0.15 Гц. С 10:40 и до 11:21 ДСЧ оставалось отрицательным, \bar{f}_d изменялось от 0 до -0.3 Гц. На плавный ход $\bar{f}_d(t)$ накладывалось квазипериодическое колебание с периодом 1–6 мин и амплитудой 0.1–0.3 Гц. После 11:21 и до 12:20 $\bar{f}_d \approx 0.15$ Гц, амплитуды колебаний с периодами 3 и

20 мин достигали 0.05 и 0.15 Гц соответственно. В интервале времени 12:20–13:10 $\bar{f}_d \approx 0$. Далее начали проявляться предвечерние эффекты, подобные тем, что имели место в фоновые дни.

Рассмотрим временные вариации ДС на частоте 4.004 МГц (рис. 4в, г).

28 марта в течение всего дневного времени имели место квазипериодические вариации ДСЧ (см. рис. 4е). Их амплитуда достигала 0.5 Гц. Периоды изменялись от 2 до 10 мин. До 13:00 $\bar{f}_d \approx 0$. После этого момента времени ДСЧ стало отрицательным, его модуль увеличивался от 0 до 0.4 Гц. Наблюдались хорошо выраженные квазипериодические колебания с периодами 10 и 20 мин и амплитудой 0.25–0.30 Гц. Эти эффекты связаны с предвечерними процессами в *F*-области ионосферы.

30 марта в интервале времени 08:00–12:30 в среднем $\bar{f}_d \approx 0$. Эпизодически наблюдались квазипериодические процессы с 5–10 мин и амплитудой 0.1–0.3 Гц.

В день СЗ временные вариации ДС качественно изменились. Примерно до 10:00 $\bar{f}_d \approx 0$. Имели место квазипериодические колебания ДСЧ с пе-

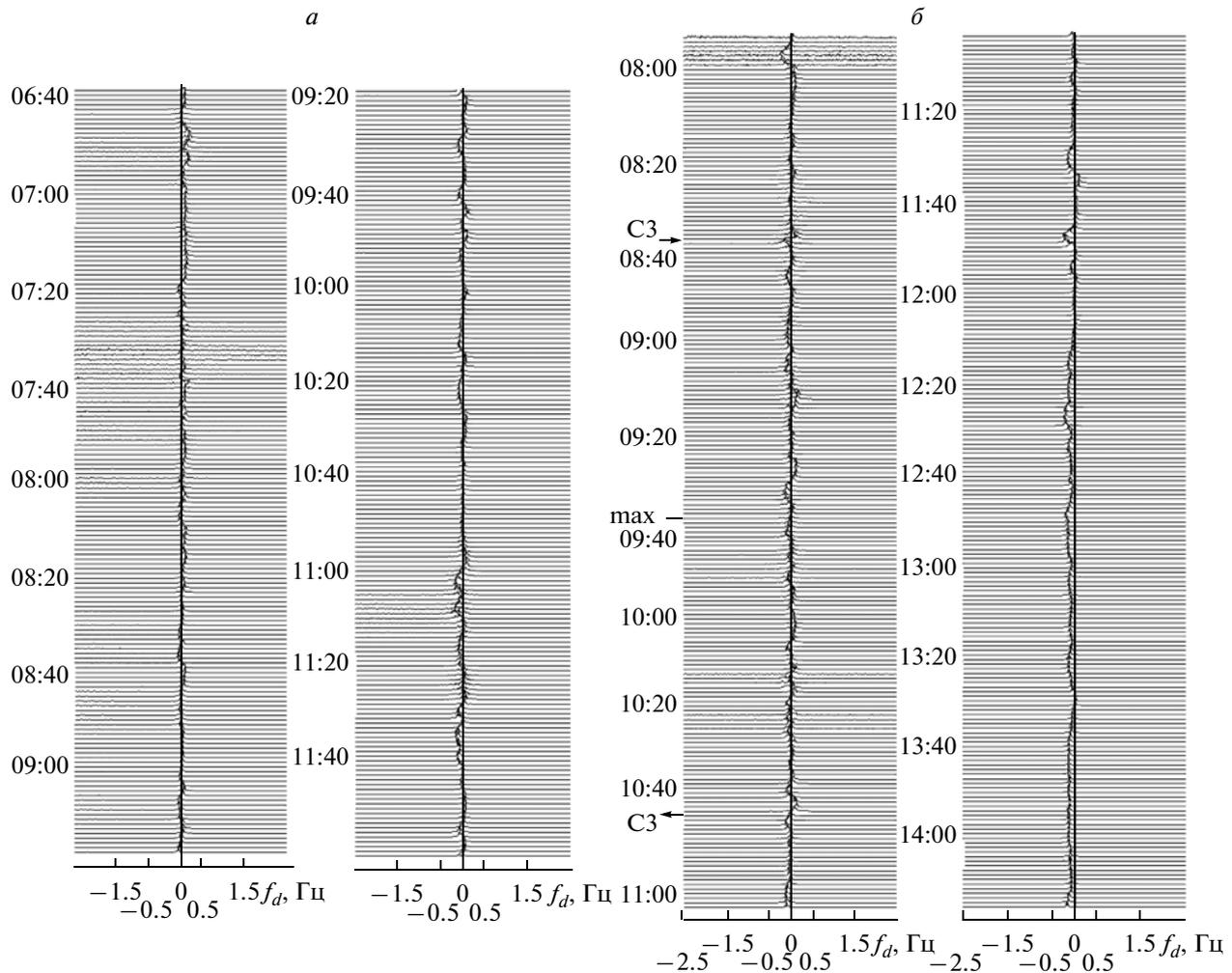


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 4.004 МГц для диапазона действующих высот 225–300 км: а – 4 октября 2005 г.; б – 3 октября 2003 г.

риодами от 3 до 15–20 мин и амплитудой 0.10–0.25 Гц (см. рис. 4з).

Практически сразу же после начала СЗ ДСЧ стало отрицательным и \bar{f}_d приняло значение ~ -0.5 Гц. Вблизи момента главной фазы затмения $\bar{f}_d \approx -1$ Гц. Через 5 мин после наступления максимального покрытия диска Солнца $\bar{f}_d \approx 0$, а затем \bar{f}_d стало быстро увеличиваться и через 10 мин достигло значения 1 Гц. Далее \bar{f}_d постепенно уменьшалось. Через 10 мин после окончания затмения $\bar{f}_d \approx 0$. На плавный ход $\bar{f}_d(t)$ накладывались квазипериодические процессы с преобладающим периодом ~ 10 мин и амплитудой, близкой к 0.15 Гц.

В интервале времени 12:20–13:00 наблюдались колебания с $T \approx 5$ мин и амплитудой ~ 0.15 Гц.

После 13:00 в F -области ионосферы отмечались предвечерние процессы, подобные процессам, зарегистрированным в фоновые дни.

СЗ 1 августа 2008 г. Доплеровские измерения 31 июля, 1 и 2 августа 2008 г. проведены на частотах 3.2 и 4.2 МГц. В ходе СЗ критическая частота уменьшалась до 4.0 МГц. Непрерывные доплеровские измерения на большей частоте оказались невозможными из-за исчезновения отраженного сигнала.

В течение всех дней эпизодически ДС становились диффузными, что было обусловлено наличием частично экранирующего слоя E_s . В этих случаях ДСЧ приписывалось к составляющей с наибольшей амплитудой.

Поведение ДС на частоте $f = 3.2$ МГц было следующим.

31 июля до 08:30 спектры оставались одномодовыми, флуктуации ДСЧ f_d не превышали ± 0.1 Гц. После 08:30 появляется слой E_s и ДС становятся диффузными. Диффузность усиливается в интервале времени 09:40–11:10. Амплитуда биений при этом уменьшается, но отношение сигнал/шум

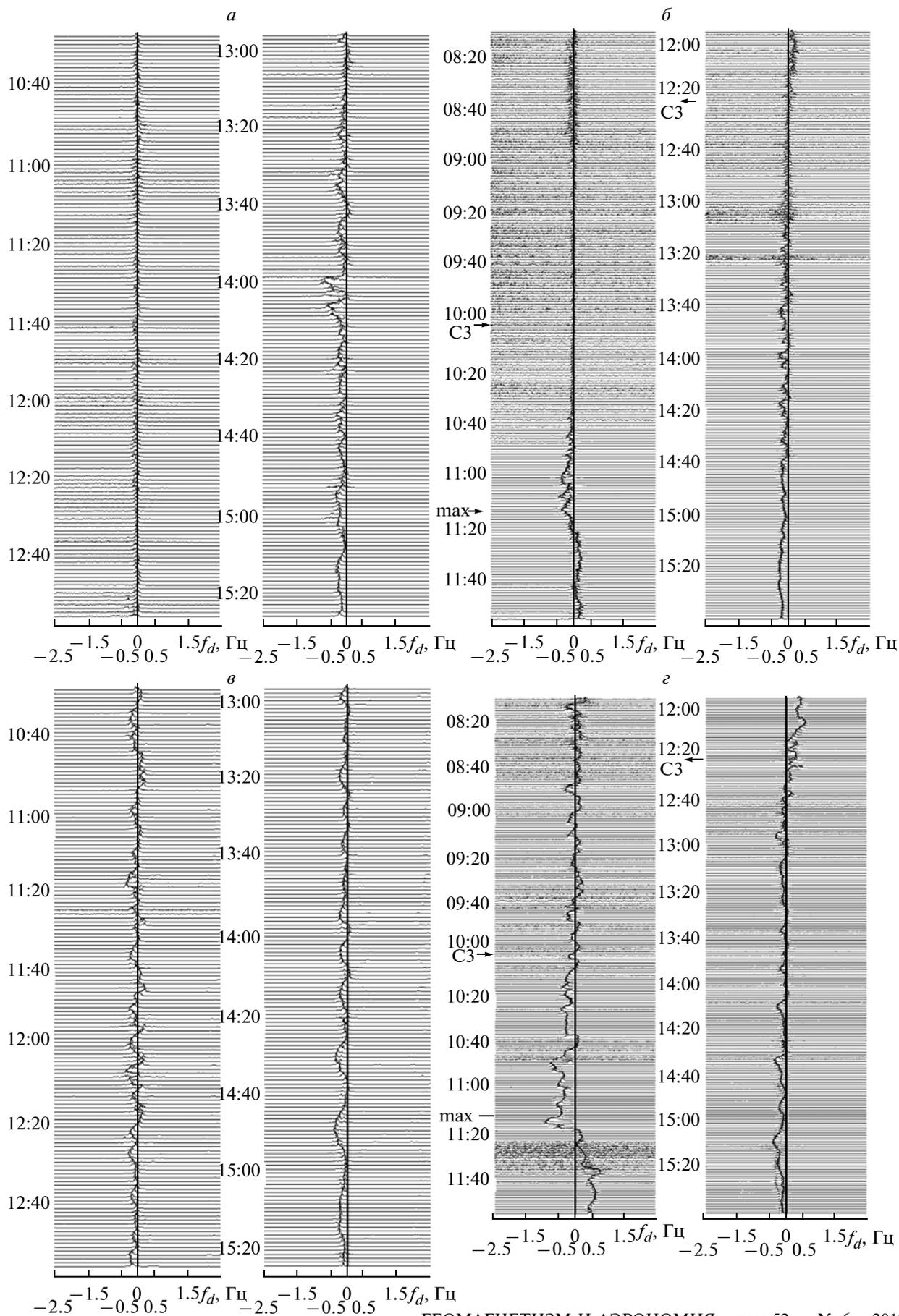


Рис. 4. Временные вариации доплеровских спектров: *a* – 28 марта 2006 г. (частота – 2.74 МГц, для диапазона действующих высот 300 – 375 км); *b* – 29 марта 2006 г. (частота – 2.74 МГц, для диапазона действующих высот 225 – 300 км); *в* – 28 марта 2006 г. (частота – 4.004 МГц, для диапазона действующих высот 300 – 375 км); *г* – 29 марта 2006 г. (частота – 4.004 МГц, для диапазона действующих высот 375 – 450 км).

остается достаточным для уверенной регистрации доплеровского эффекта. Ширина диффузных спектров достигает 1–2 Гц, в то время как в невозмущенных условиях она не превышает 0.1 Гц.

После 11:10 ДС уширились незначительно (до 0.2–0.4 Гц). В светлое время суток в среднем $f_d \approx 0$.

После 11:40 в ионосфере эпизодически возникали квазипериодические процессы с квазипериодом $T \approx 5–15$ мин. Их продолжительность составляла 20–60 мин. Амплитуда $f_{da} \approx 0.1–0.2$ Гц.

2 августа временные вариации ДС были следующими (рис. 5*a*). Среднее значение $\bar{f}_d(t) \approx 0$. В интервале времени 08:25–08:50 ДС были диффузными. Их ширина увеличивалась до 0.5 Гц.

С 10:10 до 11:10 имело место значительное усиление диффузности, ширина ДС при этом достигала 2 Гц. В то же время уровень сигнала оставался практически неизменным, отношение сигнала/помеха – большим. И в этот день диффузность была вызвана влиянием слоя E_s .

После 11:20 в ионосфере наблюдался квазипериодический процесс с $T \approx 10–15$ мин. Его продолжительность была не менее 60 мин. Примерно с 12:40 и до 14:10 имели место значительные (и даже гигантские) вариации ДС. Гигантским вариациям соответствовали ДСЧ в 1–1.5 Гц. Значения f_d , оставаясь отрицательными, при этом изменялись на 1–1.5 Гц за время 10–15 мин. ДС при этом носили скорее диффузный характер.

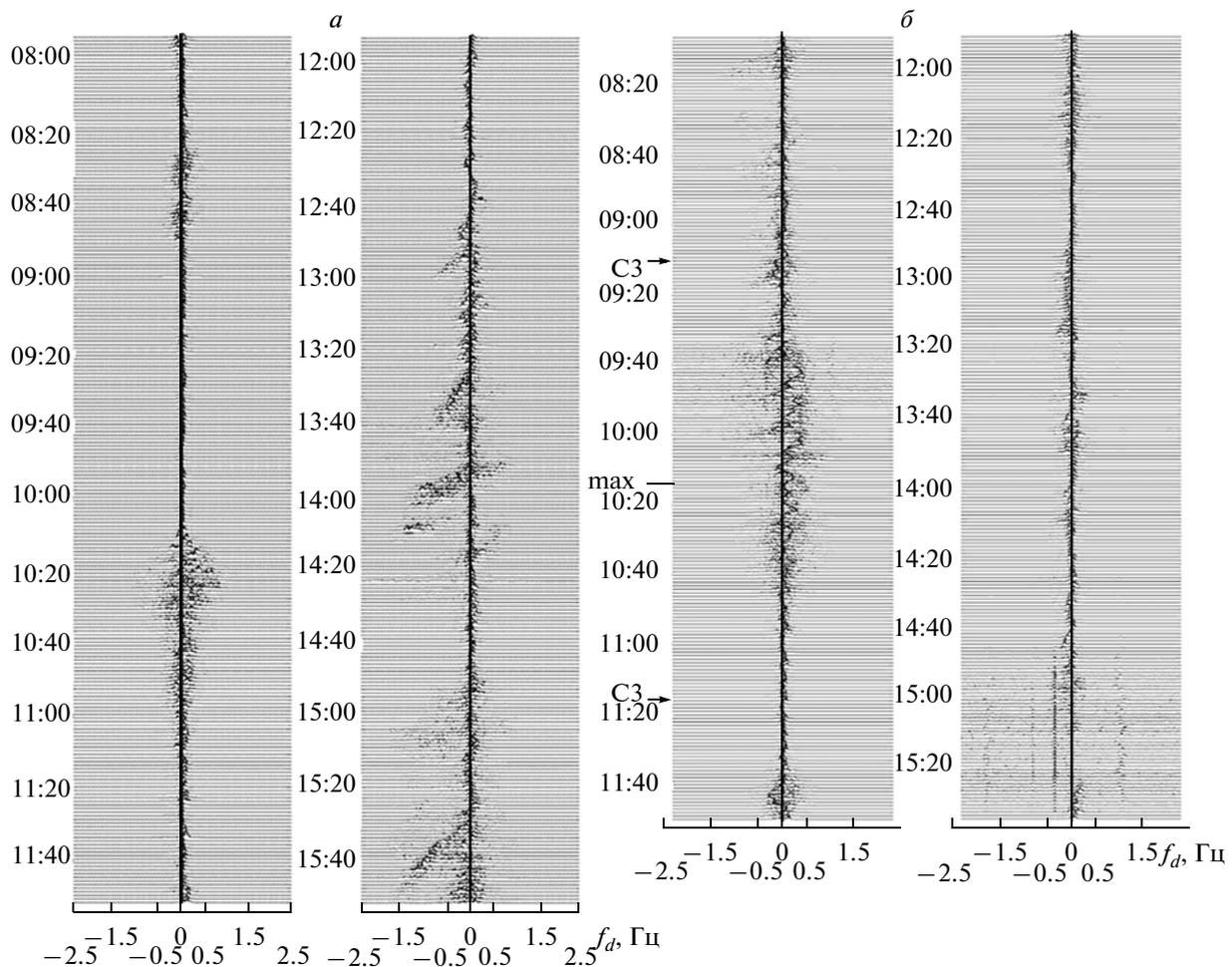


Рис. 5. Временные вариации доплеровских спектров на частоте 3.2 МГц для диапазона действующих высот 75 – 150 км: *a* – 1 августа 2008 г.; *b* – 2 августа 2008 г.

Следующие гигантские вариации ДС наблюдались в интервале времени 15:25–15:40. Значения f_d достигали -1.3 Гц в течение ~ 15 мин.

Опишем поведение ДС в день СЗ (рис. 5б). Примерно с 08:00 и до 09:00 имели место квазипериодические вариации f_d . Величина квазипериода составляла 4–6, иногда и 10 мин, а амплитуда – ~ 0.05 Гц.

Примерно с 09:15–09:20 амплитуда колебаний стала увеличиваться от 0.2 до 0.3 Гц, значение квазипериода было ~ 5 –10 мин. Характер колебаний существенно изменился после 09:41, т.е. примерно через 30 мин после начала затмения.

Второй раз характер колебаний изменился примерно в 10:15–10:19, т.е. в момент главной фазы СЗ. В целом квазипериодический процесс с амплитудой $f_{da} \approx 0.15$ –0.20 Гц имел место в течение 90 мин, т.е. примерно до 11:00. После этого его амплитуда не превышала 0.05 Гц. В интервале времени 11:40–12:30 спектры приобрели диффузный характер.

После 13:30 ДС были преимущественно одно-модовыми, эпизодически они уширялись примерно до 0.3 Гц.

Важно отметить, что в интервале времени с 09:10 до 10:50, т.е. практически в течение всего СЗ, ДС приобретали диффузионный характер. Причиной диффузности было экранирующее действие слоя E_s . Ширина спектров достигала 0.5–0.8 Гц.

Добавим также, что с 09:11 до 10:00 эпизодически появлялась мода с $f_d \approx -0.4$ Гц, но ее амплитуда и продолжительность были небольшими, поэтому она часто “тонула” в диффузном спектре. В целом же в интервале времени с 09:40 и до 10:50 преобладала мода с ДСЧ, достигающим 0.3–0.4 Гц.

После 11:00 в среднем $f_d(t) \approx 0$.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

В четырех из пяти проанализированных дней с частными СЗ четко наблюдались вариации ДС, вызванные затмением. Лишь 3 октября, когда функция покрытия не превышала 0.13, эффекты затмения надежно выявить не удалось.

Можно выделить три характерных эффекта СЗ.

Первый из них представляет собой регулярные вариации ДС: вскоре после начала затмения ДСЧ становится отрицательным и достигает значения $f_{d\min}$, вблизи момента главной фазы СЗ $f_d \approx 0$, а после этого момента ДСЧ становится положительным, достигает значения $f_{d\max}$ и примерно через 60–90 мин принимает значения, свойственные невозмущенным условиям. Такое поведение ДСЧ объясняется движением области отражения сначала вверх на стадии покрытия диска Солнца, а затем вниз на стадии уменьшения затенения диска Солнца. На первой стадии концентрация электронов N_0 уменьшается до своего минимального

значения N_{\min} , на второй стадии – увеличивается от N_{\min} до определенного значения N .

Второй эффект заключается в том, что для всех СЗ (кроме затмения 3 октября 2005 г.) $|f_{d\min}|$ было меньше $f_{d\max}$. Кроме того, продолжительность первой стадии всегда была меньше, чем второй. Все это свидетельствует о том, что СЗ вызывало срабатывание механизма дополнительного увеличения концентрации электронов. Скорее всего, таким механизмом является стимулированное затмением высывание “мягких” электронов с энергиями ~ 0.1 –1 кэВ из магнитосферы [Черногор, 2000].

Третий эффект представляет собой усиление ВВ с периодами примерно от 3 до 60–80 мин. Такие периоды имеют акустико-гравитационные волны (АГВ) в атмосфере Земли. Подчеркнем, что СЗ вызывает усиление и/или генерацию не только внутренних гравитационных волн – ВГВ – (периоды $T \approx 10$ –80 мин), но и инфразвуковых волн (периоды $T \approx 3$ –5 мин).

Вариации ДСЧ с периодами $T \approx 60$ –150 мин вызваны не генерацией ВГВ, а аperiodическим изменением $f_d(t)$ с характерным временем ~ 60 –150 мин.

7. ВЫВОДЫ

1. Обнаружены три характерных эффекта СЗ.
2. Установлено, что в течение четырех СЗ с фазой покрытия 0.42–0.78 имели место значительные вариации ДС. Сначала спектры сдвигались в сторону отрицательных значений ДСЧ, а затем – в сторону положительных значений ДСЧ (первый эффект). При этом максимальное отклонение (по модулю) в течение разных затмений составляло 0.1–1.0 Гц.
3. Впервые выявлено, что во всех случаях $|\bar{f}_{d\min}| < \bar{f}_{d\max}$ (второй эффект). Эффект обусловлен, скорее всего, дополнительной ионизацией области E и нижней части области F ионосферы высыпавшимися из магнитосферы энергичными электронами.

В течение СЗ 3 октября 2005 г. такой эффект уверенно не наблюдался из-за незначительного покрытия диска Солнца (фаза не превышала 0.24).

4. Все СЗ сопровождалось изменением характера квазипериодических процессов в ионосфере, амплитуды, спектрального состава и периодов колебаний (третий эффект). В течение затмений происходило усиление и/или генерация как ВГВ (период $T \approx 10$ –80 мин), так и инфразвуковых волн (период $T \approx 3$ –5 мин).

Инфразвуковые волны обнаружены впервые.

Продолжительность квазипериодических процессов обычно изменялась от десятков минут до 1.5–2 часов. Для инфразвука продолжительность процесса составляла единицы – десятки минут.

5. В ряде случаев ДС носили диффузный характер. Этот эффект наиболее четко был выражен 1 августа 2008 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *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 аэрномия. Т. 45. № 4. С. 526–551. 2005.
- *Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Черняков С.М., Терещенко В.Д.* Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 1. С. 103–108. 2007.
- *Бойтман О.Н., Калихман А.Д., Тацилин А.В.* Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Результаты наблюдений и сравнение с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39. № 6. С. 52–60. 1999.
- *Борисов Б.Б., Егоров Д.А., Егоров Н.Е. и др.* Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 3. С. 94–103. 2000.
- *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 193–208, Т. 46. № 2. С. 209–218. 2006.
- *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., Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // Космічна наука і технологія. Т. 14. № 4. С. 82–91. 2008.
- *Гоков А.М., Черногор Л.Ф.* Результаты наблюдений процессов в нижней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. Т.5. №4. С. 348–360. 2000.
- *Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 3. С. 350–364. 2008.
- *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.
- *Мусатенко С.И., Максименко О.И., Мусатенко Ю.С., Чолий В.Я., Сухой А.А., Курочка Е.В., Слипченко А.С., Москалюк В.И., Делюков А.А.* Возмущения в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 11 августа 1999 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 1. С. 78–87. 2006.
- *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.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- *Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Chernukhov V.V.* Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // Geophys. Res. Lett. V. 25. № 4. P. 465–468. 1998.
- *Baron M.J.* Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total eclipse of July 10, 1972 // J. Geophys. Res. V. 78. № 31. P. 7451–7460. 1973.
- *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.
- *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.
- *Chernogor L.F., Rozumenko V.T.* Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. V. 13. № 2. P. 120–137. 2008.
- *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.
- *Farges F., Le Pichon A., Blanc E., Perez S., Alcoverro B.* Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999 // J. Atmos. Solar Terr. Phys. V. 65. № 6. P. 717–726. 2003.
- *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.
- *MacPherson B., Gonzalez S.A., Silzer M.P., Bailey G.J., Djuth F., Rodriguez P.* Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998 // J. Geophys. Res. V. 105. № A10. P. 23.055–23.068. 1998.
- *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. V. 48. № 3. P. 434–438. 1982.
- *Salah J.I., Oliver W.L., Foster J.C., Holt J.M., Emery B.A., Roble R.G.* Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. V. 91. № A2. P. 1651–1660. 1986.