

УДК 550.388

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы 4, Харьков, 61022
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Волновые процессы в ионосфере над Европой, сопровождаящие солнечное затмение 20 марта 2015 г.

По данным сети ионозондов, расположенных в Европе, проанализированы ионосферные возмущения на высоте около 300 км, которые сопутствовали солнечному затмению 20 марта 2015 г. Подтверждено, что затмение сопровождалось генерацией гравитационных волн в нейтральной атмосфере и перемещающихся ионосферных возмущений. Период последних был 30...100 мин, а амплитуда относительных возмущений концентрации электронов составляла 4...19 %. Возмущения продолжались не менее 2 ч. В течение затмения амплитуда возмущений чаще увеличивалась, в одном случае она уменьшалась в результате подавления наблюдавшегося прежде волнового процесса процессом, сгенерированным затмением.

ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРІ НАД ЄВРОПОЮ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ 20 БЕРЕЗНЯ 2015 р., Черногор Л. Ф. — За даними мережі іонозондів, розташованих у Європі, проаналізовано іоносферні збурення на висоті 300 км, що супроводжували сонячне затемнення 20 березня 2015 р. Підтверджено, що затемнення супроводжувалось генерацією гравітаційних хвиль у нейтральній атмосфері та рухомих іоносферних збурень. Період останніх дорівнював 30...100 хв, а амплітуда відносних збурень концентрації електронів складала 4...19 %. Збурення продовжувалися не менше ніж 2 год. Протягом затемнення амплітуда збурень частіше збільшувалась, в одному випадку вона зменшувалась у результаті придушення хвильового процесу, який спостерігався раніше, процесом, що був згенерований затемненням.

PROPAGATING WAVES AND PROCESSES ASSOCIATED WITH THE MARCH 20, 2015 SOLAR ECLIPSE IN THE IONOSPHERE OVER EUROPE, by Chernogor L. F. — Ionosonde data for the March 20, 2015 solar eclipse period acquired over Europe have been used to analyze iono-

spheric disturbances near 300-km altitude. The analysis has established that the eclipse was associated with the generation of gravity waves and traveling ionospheric disturbances. The latter waves had periods of 30—100 min and 4—19 % amplitudes of disturbances in the electron density on a relative scale. The disturbances lasted no shorter than two hours. During the eclipse, the disturbance amplitude more often exhibited an increase, while in one case, a decrease that resulted from suppressing waves that existed prior to the eclipse by waves generated by the eclipse.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечное затмение (СЗ) представляет исследователю уникальную возможность проследить за динамикой системы Земля (ее внутренние оболочки) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера и вариациями геофизических полей на интервале времени в несколько часов [5]. Возмущения в этой системе, вызванные различными СЗ, существенно различаются. Параметры этих возмущений зависят от времени наступления затмения, состояния космической погоды, сезона и положения в цикле солнечной активности, географических координат и величины покрытия диска Солнца [5].

Исследование эффектов солнечного затмения в ионосфере имеет столетнюю историю. Первые радиофизические наблюдения эффектов СЗ были выполнены еще в 1912 г. [20]. Сначала изучалось влияние затмений на распространение радиоволн в ионосфере. Начиная с затмения 31 августа 1932 г. стали изучаться динамические процессы в ионосфере, сопровождавшие затмения [28]. Самым распространенным методом наблюдения сначала был метод вертикального зондирования, использующий ионосферные станции (ионозонды) [2, 7, 12, 22, 25]. Арсенал используемых методов значительно расширился в 1960-х гг. Стали широко использоваться спутниковые и ракетные методы [1, 9, 10, 18, 23, 24, 26, 33], метод некогерентного рассеяния [5, 21, 29], метод доплеровского зондирования [11, 15—17, 19, 25], а также целый ряд других методов [4, 14, 22, 23, 32].

Исследование эффектов солнечного затмения по-прежнему является актуальной задачей [1, 5, 7, 13—17, 19, 25].

Наблюдения показали, что солнечные затмения сопровождаются рядом устойчивых эффектов в ионосфере: уменьшением концентрации и температуры электронов N , увеличением действующей высоты отражения, запаздыванием уменьшений N по отношению к моменту наступления максимальной фазы затмения, значительными вариациями вертикальной скорости движения плазмы, потоков плазмы и тепла, а также генерацией квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере. В то же время следует иметь в виду, что каждому затмению присущи свои, индивидуальные, особенности. Спецификой затмения 20 марта было то, что оно имело место на фоне релаксирующей геокосмической бури, начавшейся 17 марта 2015 г.

Цель настоящей работы — анализ результатов наблюдений возмущений в ионосфере, сопровождавших солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом.

Общие сведения о солнечном затмении. Полное затмение началось над Атлантическим океаном, охватило Арктику, Европу и значительную часть Азии. В Центральной и Восточной Европе максимальная фаза M_{\max} затмения изменялась примерно от 0.43 (в Ростове-на-Дону) до 0.97 (в Рейкьявике). На границе Европы и Азии, например в Екатеринбурге, $M_{\max} = 0.53$. Затмение было существенным даже в Новосибирске ($M_{\max} = 0.39$) и Астане ($M_{\max} = 0.33$). Если в Париже затмение наблюдали с 08:22 UT до 10:40 UT, то в Новосибирске оно имело место с 10:12 до 11:49 UT.

Состояние космической погоды. 16 и 17 марта 2015 г. наблюдалось увеличение более чем на порядок концентрации n_{sw} частиц солнечного ветра. 17—22 марта скорость солнечного ветра V_{sw} возросла в 1.5 раза. 17 марта температура частиц T_{sw} увеличилась на порядок. Рост концентрации и температуры привел к увеличению давления газа p_{sw} в солнечном ветре. 17 марта составляющая B_z межпланетного магнитного поля повернула к югу, т. е. возникла ситуация, когда $B_z < 0$. Минимальное значение B_z составляло -15 нТл. Началась магнитная буря, которая сопровождалась увеличением на 1-2 порядка энергии A , поступающей в магнитосферу от солнечного ветра, а также индексов AE , K_p и D_{st} . Значения последних достигали 1600 нТл, 8 и -230 нТл соответственно. Добавим, что данная буря — самая сильная в текущем цикле солнечной активности. Буря, постепенно затухая, продолжалась в течение недели. Так, 20 и 21 марта суммарный индекс K_p равнялся 27 и 22 соответственно. 20 марта имела место релаксирующая ионосферная буря, точнее ее отрицательная фаза [6]. Значения критической частоты f_0F2 были примерно на 1...2 МГц ниже, чем в контрольный день 21 марта. 21 марта ионосфера была слабо возмущенной, поэтому этот день в работе рассматривался как контрольный.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Сеть ионозондов. Для изучения эффектов затмения 20 марта 2015 г. использовались данные европейских ионозондов, перечень которых представлен в табл. 1. Из табл. 1 видно, что затмение имело место в утреннее и дневное время, угловая высота Солнца над горизонтом изменялась от 17 до 51° . Максимальная фаза и площадь покрытия варьировали в пределах $0.43...0.95$ и $0.32...0.95$ соответственно.

Как известно, ионозонды регистрируют высотно-частотные характеристики (ионограммы). Ионограммы размещены на сайте [<http://umlcar.uml.edu/stationlist.html>]. Обычно ионограммы на станциях, функционирующих в дежурном режиме, снимаются с дискретностью $t = 15$ мин. В день затмения ионограммы регистрировались чаще: каждые $0.5...15$ мин (см. табл. 1).

Таблица 1. Географические координаты и ионозондов, времена UT начала, максимальной фазы и окончания $S3$, фаза M затмения, покрытие P диска, высота h и азимут A Солнца, дискретность t регистрации ионограмм 20 и 21 марта

Ионозонд	, град	, град	$\frac{T_{\text{н}}, T_{\text{макс}}, T_{\text{о}}}{}$	M	P	h , град	A , град	t , мин (20/21 марта)
Тромсё	69.6 N	19.2 E	09:04:52	0.95	0.95	17.9	152.1	15/15
			10:08:49			19.8	168.8	
			11:13:19			20.1	186.0	
Фейрфорд	51.7 N	1.5 W	08:24:10	0.88	0.86	19.3	116.8	15/15
			09:29:54			27.7	132.3	
			10:39:40			34.5	151.1	
Дурбе	50.1 N	4.6 E	08:26:25	0.82	0.78	23.8	122.3	0.5/0.5
			09:33:42			32.0	138.9	
			10:44:48			37.9	159.4	
Юлиусрух	54.6 N	13.4 E	08:41:34	0.82	0.78	26.9	136.2	15/15
			09:49:53			32.5	154.8	
			11:00:29			35.1	175.8	
Прухонице	50.0 N	14.6 E	08:36:41	0.74	0.68	30.1	134.4	3/15
			09:45:36			36.7	153.5	
			10:57:10			39.7	176.1	
Рокетес	40.8 N	0.5 E	08:08:53	0.70	0.64	22.6	111.5	5/5
			09:13:58			33.5	125.3	
			10:24:21			43.0	144.2	
Эль Ариносильо	37.1 N	6.7 W	07:58:27	0.69	0.62	16.5	103.2	15/15
			09:00:12			28.1	114.2	
			10:07:43			39.6	129.2	
Москва	55.5 N	37.3 E	09:12:25	0.65	0.57	34.1	172.2	3/15
			10:19:38			33.7	192.4	
			11:25:57			30.2	211.6	
Сан-Вито	40.6 N	17.8 E	08:30:25	0.54	0.45	37.4	131.5	15/15
			09:37:23			45.4	151.2	
			10:47:23			49.1	176.6	
Харьков	49.6 N	36.3 E	09:09:25	0.54	0.44	39.6	169.3	5/5
			10:15:52			39.6	190.9	
			11:21:33			35.8	211.2	
Афины	38.0 N	23.5 E	08:39:15	0.43	0.32	43.6	138.6	2/5
			09:43:13			50.1	160.1	
			10:49:11			51.6	186.3	

Методика анализа. Основными параметрами, которые описывают состояние ионосферы вблизи максимума ионизации, являются критическая частота f_0F2 ионосферного слоя F2 и высота h_p этого слоя, аппроксимируемого параболической зависимостью. Для f_0F2 справедливо следующее соотношение [30]:

$$f_0F2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{e^2 N}{\epsilon_0 m}}, \quad (1)$$

где e и m — заряд и масса электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная, N — концентрация электронов. Вариации N приводят к изменениям f_0F2 . При этом

$$N / N_0 = (f_0F2 / f_0F2_0)^2, \quad (2)$$

$$N / N_0 = 1 - (f_0 F_2 / f_0 F_{2_0})^2 \quad (3)$$

где $f_0 F_{2_0}$ и N_0 — невозмущенные значения $f_0 F_2$ и N , которые бы имели место в отсутствие затмения.

Аналізу подлежали временные вариации $f_0 F_2(t)$ и $h_p(t)$ 20 марта 2015 г. и в контрольный день 21 марта 2015 г. Для выявления квазипериодических (волновых) процессов анализировались временные вариации флуктуаций

$$\begin{aligned} f_0 F_2(t) &= f_0 F_2(t) - \overline{f_0 F_2(t)}, \\ h_p(t) &= h_p(t) - \overline{h_p(t)}, \end{aligned}$$

где $\overline{f_0 F_2(t)}$ и $\overline{h_p(t)}$ — скользящие средние, вычисляемые на интервале времени 150 мин шагом t .

Системный спектральный анализ. Для детального исследования квазипериодических процессов использовался системный спектральный анализ временных рядов [13]. Он основан на одновременном применении оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП). В последнем использовался материнский вейвлет в виде функции Морле [13]. Вейвлет Морле имеет вид

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos t,$$

где t и ω — безразмерные время и частота. Такой вид вейвлета целесообразно использовать для обнаружения цугов колебаний [13].

Спектральный анализ осуществлялся в диапазоне периодов T от T_{\min} до T_{\max} . Выбор минимального значения $T_{\min} = 2t$ обусловлено частотой получения ионограмм (одна ионограмма за время t). Выбор максимального значения $T_{\max} = 120$ мин объясняется тем, что такие периоды относятся еще к атмосферным гравитационным волнам. При $T > 120$ мин существенно сказываются суточные вариации $f_0 F_2$ и приливные колебания этого параметра (точнее, их высшие гармоники см., например [3]).

Кроме спектрограмм, анализировались также энергограммы (распределение энергии колебаний по периодам).

Как известно, АПФ обычно обладает лучшей разрешающей способностью по частоте (периоду), чем ОПФ. В свою очередь, ОПФ имеет лучшее разрешение по времени, чем АПФ. Важно, что АПФ имеет неизменные относительные (нормированное на длительность «окна») разрешения по времени и периоду при изменении значения относительного периода. В то же время для ОПФ они изменяются примерно на порядок. ВП позволяет «уровнять шансы» составляющих с различными частотами (периодами). По этим причинам совместное применение ОПФ, АПФ и ВП позволяет более детально исследовать частотно-временную (периодно-временную) структуру различных физических процессов.

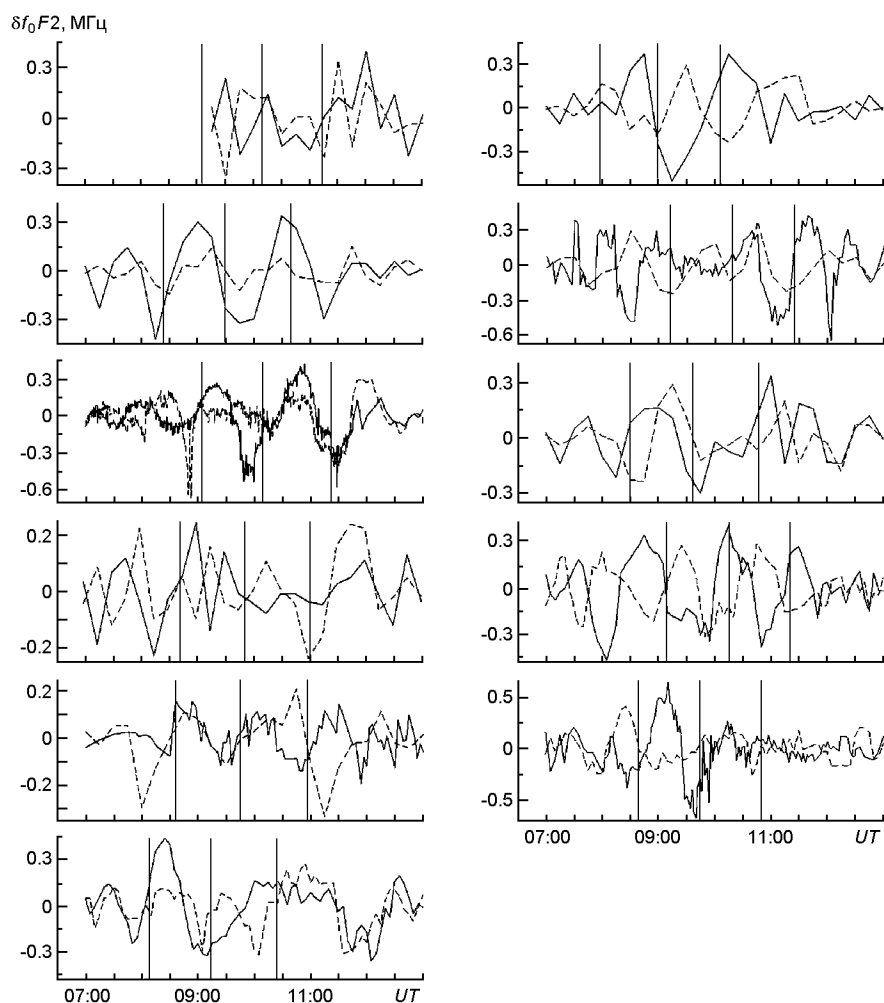
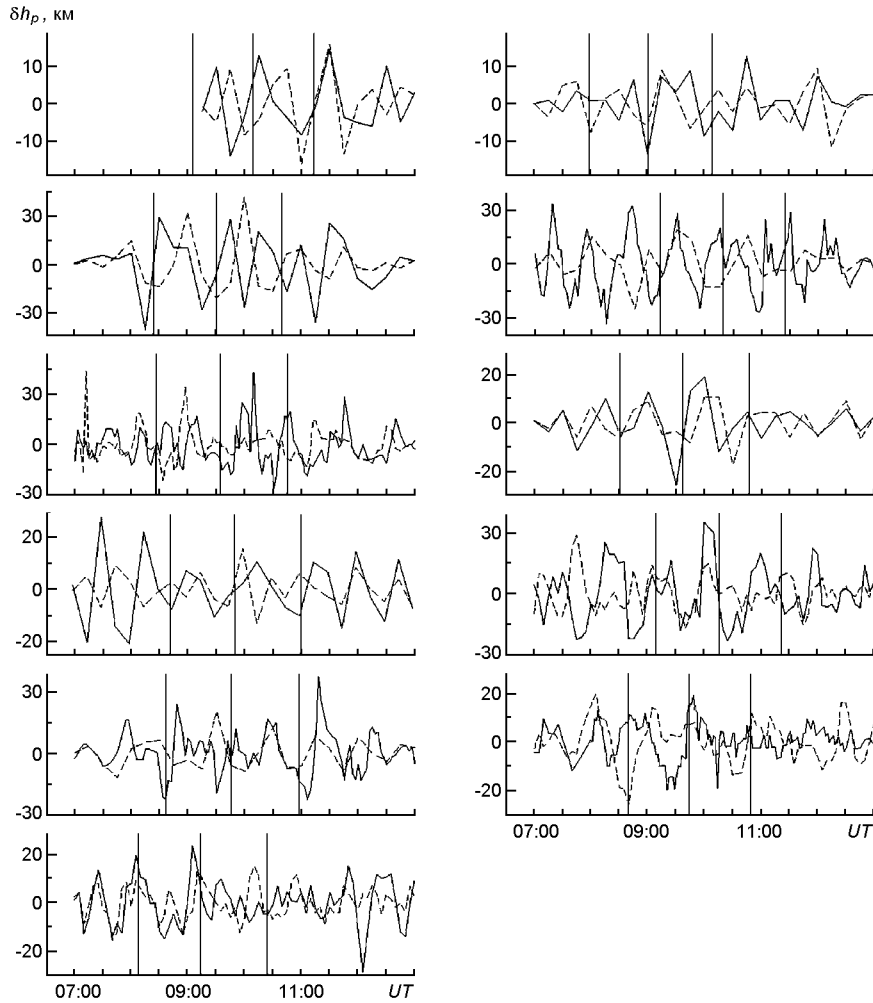


Рис. 1. Временные вариации приращения критической частоты 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и 21 марта 2015 г. (штриховая линия) для ионозондов Тромсё, Фейрфорд, Дурбе, Юлиусрух, Прухонице и Рокетес (слева), Эль Ариносилю, Москва, Сан-Вито, Харьков и Афины (справа)

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Временные вариации флуктуаций $f_0F2(t)$ и $h_p(t)$ для 11 европейских ионозондов приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Видно, что волновые процессы наблюдались в ионосфере как в день затмения, так и в контрольный день. В течение затмения характер колебаний изменялся. Чаще всего амплитуда колебаний f_a и h_{pa} увеличивалась. Особенно значительными амплитуды f_a были на ионозондах Фейрфорд (0.3 МГц), Дурбе (0.2...0.4 МГц), Рокетес (0.25...0.35 МГц), Эль Ариносилю (0.3...0.4 МГц), Москва (0.4 МГц), Харьков (0.3 МГц) и Афины (0.4...0.6 МГц) (табл. 2). Амплитуды h_{pa} достигали 20...25 км.

Рис. 2. То же для приращений высоты h_p

Относительные вариации $f_a / \overline{f_0 F2}$ и концентрации электронов N приближались к 0.10 и 0.19 соответственно. Значения $h = h_{pa} / \overline{h_p}$ достигали 0.05...0.10. Периоды колебаний $f_0 F2$ и h_p были близкими для различных ионозондов и изменялись в пределах от 30...40 до 80...100 мин. В контрольный день в интервале времени 09:00...11:30 UT амплитуда f_a обычно не превышала 0.2 МГц, а амплитуда h_{pa} — 15...20 км. Значения N находились в пределах 0.03...0.06.

Заметим, что на ионозонде Юлиусрух произошло подавление колебания, наблюдавшегося до момента наступления СЗ. Это стало возможным за счет генерации затмением нового колебания в противофазе с прежним. Действительно, до затмения получены значения f_a

0.2 МГц, h_{pa} 20 км, а в течение затмения — f_a 0.05...0.1 МГц, h_{pa} 10 км.

Таблица 2. Основные параметры квазипериодических возмущений в ионосфере 20 марта 2015 г. (день с затмением) и 21 марта 2015 г. (контрольный день)

Ионозонд	T_f , мин	$\overline{f_0 F 2}$, МГц	f_a , МГц	N	T_{hs} , мин	$\overline{h_p}$, км	h_p , км	h
Затмение 20 марта 2015 г.								
Тромсё	30...	7...	0.15...	0.04...	45...	330...	10...	0.03...
	40	8	0.20	0.06	60	360	15	0.05
Фейрфорд	80...	4.1...	0.3	0.15...	30...	300...	25...	0.07...
	100	4.5		0.17	45	360	30	0.10
Дурбе	80...	4.3...	0.2...	0.08...	50...	310...	10...	0.03...
	100	5.3	0.4	0.19	60	320	25	0.08
Юлиусрух	50...	5.9...	0.15...	0.04...	45...	310...	10...	0.03...
	70	6.8	0.20	0.05	60	320	15	0.05
Прухонице	70...	6...	0.07...	0.02...	40...	300...	10...	0.03...
	80	7	0.10	0.03	60	320	20	0.07
Рокетес	60...	4.8...	0.25...	0.08...	30...	280...	10...	0.03...
	90	6.5	0.35	0.15	60	350	15	0.05
Эль	60...	5...	0.3...	0.08...	30...	260...	5...	0.02...
	90	8	0.4	0.16	45	330	10	0.04
Москва	60	6.9...	0.4	0.11...	60	270...	20...	0.07...
		7.5		0.12		300	25	0.09
Сан-Вито	40...	6.2...	0.2	0.05...	45...	290...	10...	0.03...
	60	8.2		0.06	60	350	20	0.07
Харьков	80...	6.8...	0.3	0.08...	60	290...	20...	0.06...
	100	8		0.09		320	25	0.09
Афины	60	7.2...	0.4...	0.09...	45...	280...	10...	0.03...
		8.7	0.6	0.17	60	300	15	0.05
Контрольный день 21 марта 2015 г.								
Тромсё	60	7.4	0.15...	0.04...	60	310...	10	0.03
			0.20	0.05		340		
Фейрфорд	75	6.1	0.1	0.03	60	300...	15...	0.05...
						310	20	0.07
Дурбе	60	7.0	0.15...	0.04...	30...	280...	10...	0.03...
			0.20	0.06	40	300	15	0.05
Юлиусрух	60...	7.3	0.10...	0.03...	30...	300...	10	0.03
	80		0.20	0.05	60	330		
Прухонице	60...	8.2	0.1...	0.02...	45...	290...	10	0.03
	120		0.2	0.05	60	300		
Рокетес	60	7.7	0.2	0.05	45...	275...	10	0.03...
					60	310		0.04
Эль	90	7.9	0.15...	0.04...	30...	265...	5...	0.02...
			0.20	0.05	45	290	7	0.03
Москва	50...	9.7	0.2...	0.04...	45...	280...	15	0.05
	60		0.3	0.06	60	315		
Сан-Вито	45...	9.4	0.05...	0.03...	45...	300...	5...	0.02...
	75		0.20	0.04	60	315	10	0.03
Харьков	60...	9.3	0.2	0.04	30...	300...	10...	0.03...
	70				60	310	15	0.05
Афины	60	10.3	0.15...	0.03...	40...	290...	5...	0.02...
			0.20	0.04	60	310	15	0.03

РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Анализ квазипериодических вариаций $f_0 F 2(t)$. Примеры результатов системного спектрального анализа вариаций $f_0 F 2(t)$ для ионозондов Харьков и Фейрфорд приведены на рис. 3. Видно, что в течение СЗ спектральный состав и амплитуды колебаний существенно изменя-

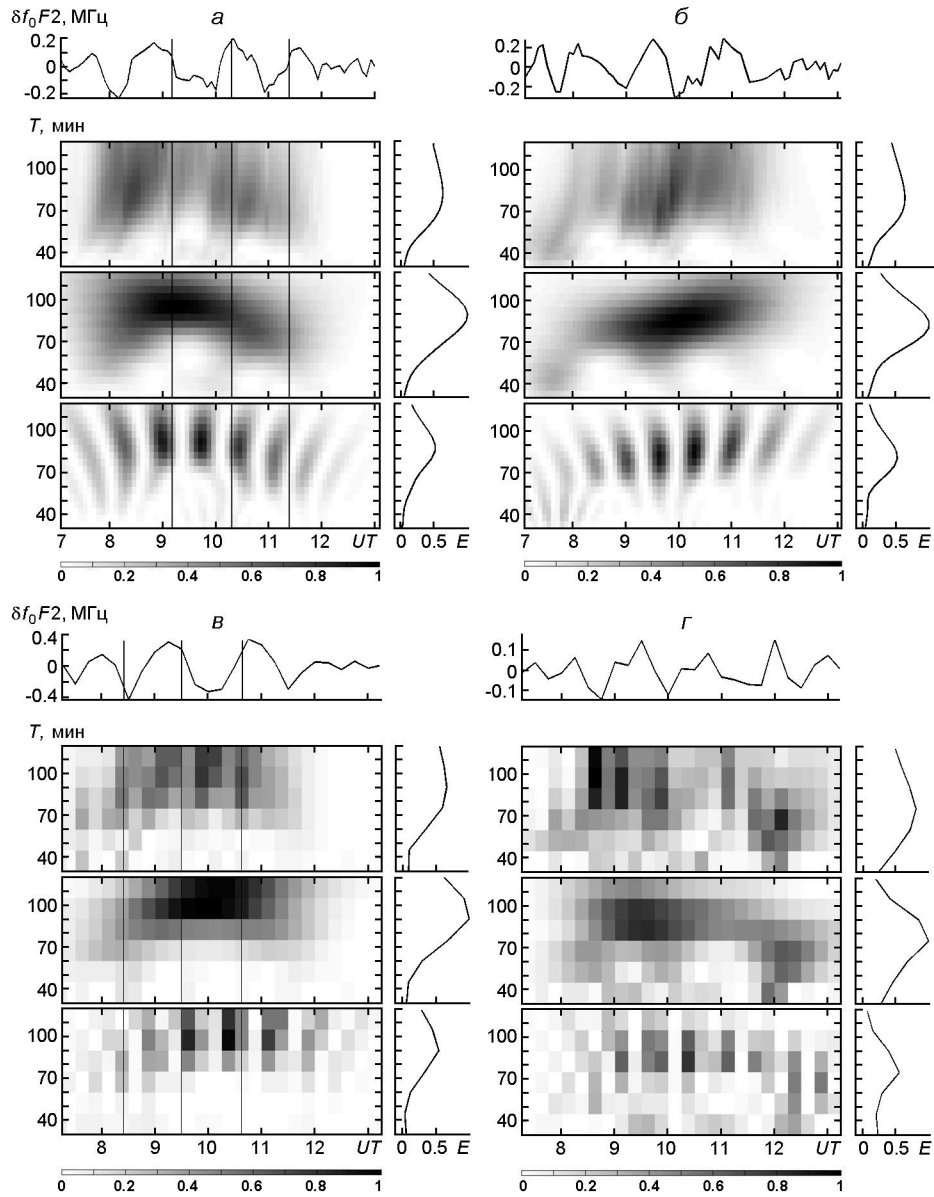


Рис. 3. Результаты системного спектрального анализа приращений f_0F2 для ионозонда Харьков 20 марта (а) и 21 марта (б), а также ионозонда Фейрфорд 20 марта (в) и 21 марта 2015 г. (г). Сверху вниз: временная зависимость $f_0F2(t)$, спектрограмма ОПФ, спектрограмма АПФ и спектрограмма ВП; справа — энергограммы соответствующих спектрограмм

лись. Основные результаты спектрального анализа представлены в табл. 2. Сравнение амплитуд и периодов колебаний для 20 и 21 марта 2015 г. показало, что в день затмения они заметно отличались от тех, что были в контрольный день.

Анализ квазипериодических вариаций $h_p(t)$. Примеры результатов системного спектрального анализа вариаций $h_p(t)$ для ионозон-

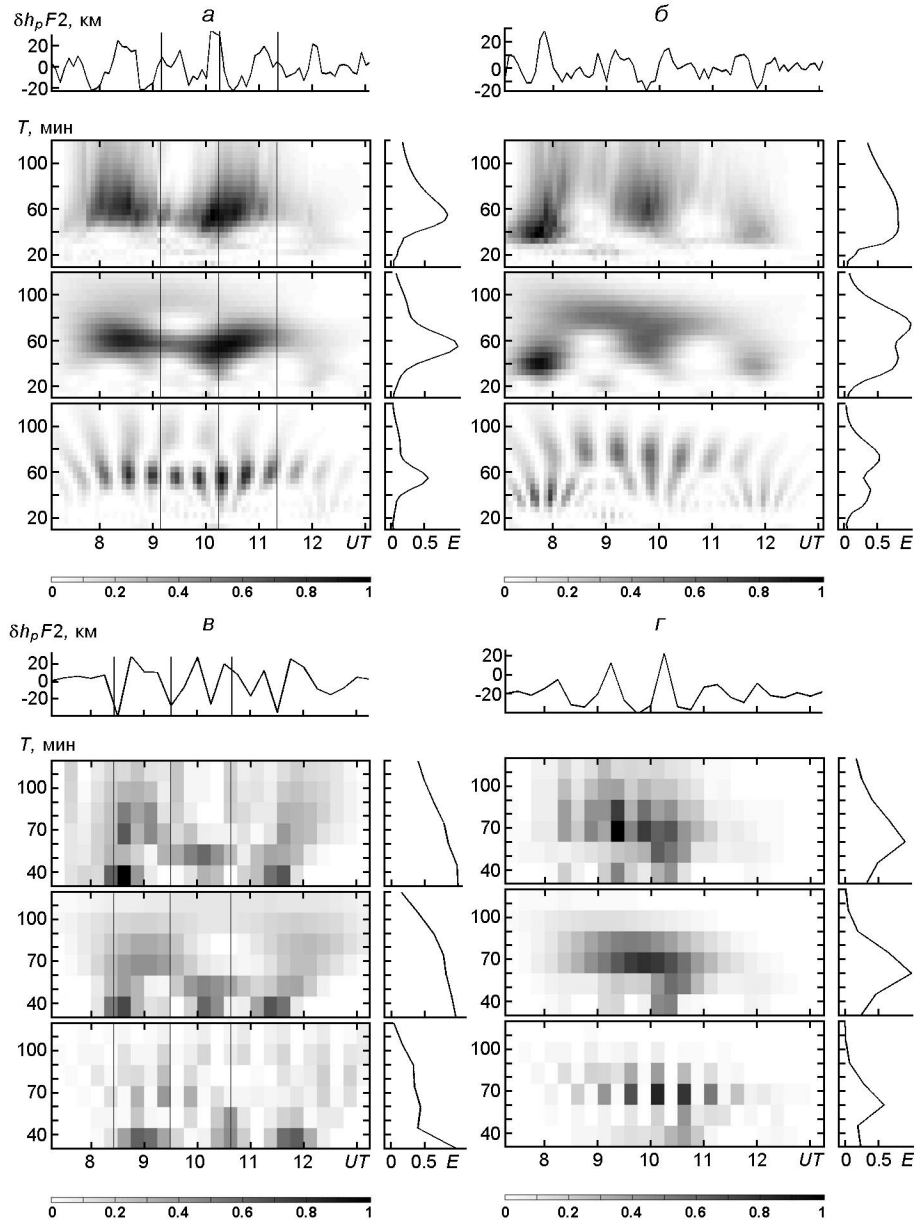


Рис. 4. То же для приращений $h_p(t)$

дов Харьков и Фейрфорд приведены на рис. 4. Видно, что затмение сопровождалось заметными изменениями спектрального состава и амплитуд колебаний. Об этом же свидетельствует и сравнение спектрограмм для 20 и 21 марта 2015 г. Данные об амплитудах и периодах, полученные по результатам системного спектрального анализа, сведены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ временных вариаций $f_0F2(t)$ и $h_p(t)$ для 11 европейских ионозондов, а также соответствующих спектрограмм позволил установить, что СЗ сопровождалось активизацией волновых процессов над Европой. Моменты усиления или подавления колебаний f_0F2 и h_p под действием затмения практически совпадали, т. е. вариации f_0F2 и h_p были почти синхронными. Примерно в половине числа случаев колебания усиливались с временем запаздывания t около 0.2...0.5 ч после начала СЗ, в половине числа случаев они подавлялись с t 1.2...1.3 ч. Подавление, очевидно, объясняется сложением сгенерированного затмением колебания с колебанием, наблюдавшимся в ионосфере ранее. Амплитуда относительных возмущений концентрации электронов для различных ионозондов изменялась в пределах 0.04...0.19. В то же время в контрольный день она варьировала в пределах 0.03...0.06. Заметно отличались и периоды колебаний. Всё это свидетельствовало в пользу того, что СЗ было источником волновых возмущений в ионосфере.

Механизм генерации был следующим. В области тени, созданной затмением, возникал дефицит тепловой энергии значительного объема атмосферы. Возникал градиент давления с характерным масштабом $L \sim 1000$ км, приводящий к генерации длинных волн плотности в атмосфере (~ 1000 км), именуемых гравитационными волнами [3]. Волны в газе на высотах ионосферы модулировали с тем же периодом концентрацию электронов, квазипериодические вариации которой наблюдались при помощи ионозондов.

Оценим период генерируемых волн при $L = 600...1800$ км и типичной скорости волн, примерно равной скорости звука v_s . При $v_s = 330$ м/с имеем $T = L / v_s = 1800...5400$ с = 30...90 мин. Именно такие периоды наблюдались в течение СЗ.

Результаты исследования волновых процессов в течение солнечного затмения 20 марта 2015 г. находятся в согласии с результатами наших прежних наблюдений [5, 14—17, 19] и существенно их дополняют.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что солнечное затмение 20 марта 2015 г. сопровождалось активизацией волновых процессов в ионосфере на высотах слоя F2. Величина отклика на затмение зависела от географического расположения ионозонда.

2. Примерно в половине числа случаев колебания усиливались с временем запаздывания t около 0.2...0.5 ч после начала затмения, в половине числа случаев они подавлялись с t 1.2...1.3 ч. Подавление, очевидно, объясняется сложением колебания, сгенерированного затмением, и колебания, наблюдавшегося в ионосфере ранее.

3. На большинстве ионозондов затмение приводило к усилению квазипериодических колебаний параметров ионосферы по сравнению с колебаниями в контрольный день. На одном ионозонде наблюдалось их ослабление в результате сложения в противофазе ранее наблюдавшегося и сгенерированного колебаний.

4. Затмение привело к существенному изменению спектрального состава и амплитуд квазипериодических процессов. По сравнению с контрольным днем относительная амплитуда колебаний концентрации электронов увеличилась в среднем в 2-3 раза.

5. Значения периода (30...100 мин) и относительной амплитуды (0.04...0.19) колебаний свидетельствовали о возникновении перемещающихся ионосферных возмущений, вызванных генерацией областью тени от затмения гравитационных волн в атмосфере Земли.

1. *Афраймович Э. Л., Водяников В. В., Воейков С. В. и др.* Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // *Геомagnetизм и аэрoнoмия.*—2007.—**47**, № 4.—С. 491—500.
2. *Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е. и др.* Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // *Геомagnetизм и аэрoнoмия.*—2000.—**40**, № 3.—С. 94—103.
3. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
4. *Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А. и др.* О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. // *Изв. вузов. Радиофизика.*—2000.—**43**, № 8.—С. 682—686.
5. *Черногор Л. Ф.* Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2013.—480 с.
6. *Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф.* Физика геокосмических бурь: Монография. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014.—408 с.
7. *Adeniyi J. O., Oladipo O. A., Radicella S. M., et al.* Analysis on 29 March 2006 eclipse effect on the ionosphere over Ilorin, Nigeria // *J. Geophys. Res.*—2009.—**114**.—P. A11303.—DOI: 10.1029/2009JA014416.
8. *Adeniyi J. O., Radicella S. M., Adimula I. A., et al.* Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station // *J. Geophys. Res.*—2007.—**112**.—P. A06314.—DOI:10.1029/2006JA012197.
9. *Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S.* Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*—2002.—**64**.—P. 1933—1941.
10. *Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., et al.* Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // *Geophys. Res. Lett.*—1998.—**25**, N 4.—P. 465—468.
11. *Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., Li N.* Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010 // *J. Geophys. Res.*—2011.—**116**.—P. A06301.—DOI: 10.1029/2010JA016305.
12. *Chen G., Zhao Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li T., Huang S., Li N.* Enhancement and HF Doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009 // *J. Geophys. Res.*—2010.—**115**. —P. A09325.—DOI:10.1029/2010JA015530.
13. *Chernogor L. F.* Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results // *Geomagnetism and Aeronomy.*—2008.—**48**, N 5.—P. 652—673.
14. *Chernogor L. F.* Variations in the amplitude and phase of VLF radiowaves in the ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse // *Geomagnetism and Aeronomy.*—2010.—**50**, N 1.—P. 100—110.

15. *Chernogor L. F.* Wave response of the ionosphere to the partial solar eclipse of August 1, 2008 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2010.—**50**, N 3.—P. 346—361.
16. *Chernogor L. F.* Effects of solar eclipses in the ionosphere: doppler sounding results // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2012.—**52**, N 6.—P. 768—778, P. 779—792.
17. *Chernogor L. F.* Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2013.—**53**, N 1.—P. 19—31.
18. *Cohen E. A.* The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations // *Radio Sci.*—1984.—**19**, N 3.—P. 769—777.
19. *Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F.* Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals // *Radio Phys. and Radio Astron.*—2011.—**2**, N 4.—P. 325—337.
20. *Eccles W. H.* Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals // *Electrician*.—1912.—**69**.—P. 109—116.
21. *Evans J. V.* An F region eclipse // *J. Geophys. Res.*—1965.—**70**.—P. 131—142.
22. *Farges T., Jodogne J. C., Bamford R., et al.* Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*—2001.—**63**.—P. 915—924.
23. *Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C., et al.* A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse // *J. Geophys. Res.*—1999.—**104A**, N 1.—P. 79—94.
24. *Hunter A. N., Holman B. K., Fieldgate D. G., Kelleher R.* Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973 // *Nature*.—1974.—**250**.—P. 205—206.
25. *Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., et al.* Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*—2008.—**70**, N 6.—P. 836—853.—DOI:10.1016/j.jastp.2007.02.016.
26. *Klobuchar J. A., Whitney H. E.* Ionospheric electron content measurements during a solar eclipse // *J. Geophys. Res.*—1965. —**70**, N 5.—P. 1254—1257.
27. *Le H., Liu L., Yue X., Wan W.* The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling // *Ann. geophys.*—2008.—**18**.—P. 107—116.
28. *Mimno H. R., Wang P. H.* Continuous Kennelley—Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer) // *Proc. Inst. Radio Engrs.*—1933.—**21**.—P. 529—545.
29. *Oliver W. L., Bowhill S. A.* The F1 region during a solar eclipse // *Radio. Sci.*—1974.—**9**, N 2.—P. 185—195.
30. *Schunk R. W., Nagy A.* *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. — Cambridge: Univ. Press, 2000.—554 p.
31. *Tomas A. T., Luhr H., Forster M., et al.* Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP // *J. Geophys. Res.*—2007.—**112**.—P. A06303.—DOI:10.1029/2006JA012168
32. *Tsai H. F., Liu J. Y.* Ionospheric total electron content response to solar eclipses // *J. Geophys. Res.*—2007.—**104A**, N 6.—P. 12657—12668.

Статья поступила в редакцию 31.10.15